

연구논문

함평지역 토양의 위해성과 인위적 부화에 의한 토양환경평가

윤석태 · 나범수

전남대학교 과학교육학부

(2008년 5월 2일 접수, 2008년 10월 28일 승인)

Soil Environmental Assesment by the Risk and Artificial Enrichment of Hampyeong District Soils

Seok-Tai Youn · Bum-Soo Na

Department of Science Education, Chonnam National University

(Manuscript received 2 May 2008; accepted 28 October 2008)

Abstract

Considering risks and artificial enrichments of metals in the soils of the study area, the study aims to analyze geology, grain size and geochemistry. Geology is mainly composed of gneisses and phyllites of metamorphic rocks, sandstones, siltstones, shales, tuffs of sedimentary ones and granites and andesites of igneous ones in the area. In the area, mean contents of metals are not meaningful in accordance with petrogenesis. The soil textures of the area are of S, IS and sL of sandy soil, L, sCL, cL of loam and C, zC and sC of clayey soil. Mean contents of Ni, Cr, Co and Cu are meaningfully high in loam and clayey soil relative to sandy soil, whereas Ni, Zn, Cd contents are higher in clayey soil than in loam. Those differences imply the metallic contents are dependent to grain size. Based on the metal contents in the soils of the study area, Cu and Zn in loams and Pb in sandy soils are corresponded to soil contamination warning standards, and As showing 75mg/kg of maximum content in loams is assigned to soil contamination countermeasure standards, respectively. Artificial enrichment factor minimized wall rock and grain size relations is over 1 in Cr, Ni and Cu, but the factor is below 1 in average of other metals.

Keywords : soil environmental assesment, risk, artificial enrichment

1. 서론

지구환경시스템(earth environment system)의 관점에서 지구화학적 환경은 크게 1차환경인 심부 환경과 2차환경인 지표환경으로 나눈다. 1차환경은 화성 및 변성활동이 일어나는 지하심부 환경으로 고온, 고압, 환원환경의 유체 이동이 제한적인 암석권을, 2차환경은 지하수면 상부의 지표환경, 풍화작용, 토양의 형성 및 퇴적작용이 일어나는 저온, 저압의 유체 이동이 활발한 지표권을 말한다(Horowitz, 1991, Alloway, 1995). 이러한 지구화학적 환경은 암석(마그마 → 결정화 → 심성암체 → 용기, 침식) → 토양(광물의 파쇄 → 수화작용 → 풍화) → 퇴적물(운반작용 → 퇴적작용) → 암석(퇴적암 → 용융 → 마그마)으로 순환하면서, 유체(대기, 하천수, 우수, 지하수 등)에 의해 자연적 물질순환 과정이 이루어지게 한다(Bowen, 1979).

자연계에서 물질순환은 지구가 탄생한 후 현재까지 계속되고 있는 살아있는 지구의 역동적인 모습을 반영한다. 그러나 최근 과학기술의 발전 속에서 인류는 자연계 물질순환의 순기능에 관여함으로써 자연계의 반작용으로 인해 환경오염에 노출되어져 있다. 즉, 물질을 활용하는 과정 속에서 부산물로 인위적으로 생성되어진 오염물질들이 다양한 형태로 생성·배출되고 있으며, 이들 물질들은 물질순환 과정 속에서 물, 대기 등의 유체를 통해 암석권, 대기권, 수권, 생물권 등의 전지구적 환경으로 분산되고 있다(Thornton, 1983).

환경오염은 인류가 자연계의 물질순환 과정에 인위적으로 관여함으로써 발생한다. 우리나라는 1960년대 산업화에 의한 경제발전의 고도성장을 가져왔지만, 여러 가지 환경오염을 유발하여 왔다. 이에 환경오염을 방지하거나 최소화하기 위해서 수질오염총량관리(환경부, 2008a), 기후변화협약(2008b; 2008c) 등을 통해 수질 및 대기 환경 보전을 위해 구체적이고 다양한 오염대책을 수립하고 실천하고 있다. 그러나 토양에 대한 환경학적 보존 대책은 1995년에 토양오염보존법(환경부, 2007)을 제정하여 오염물 배출을 규제하고 있으나, 구체적 보존 및

실천 방안은 미비한 실정이다.

토양은 모암, 기후, 지형, 식생 등의 영향을 받으며, 토양을 구성하는 성분들은 모암의 구성물질에 가장 큰 영향을 받는다(Jenny, 1941; Bowen, 1979). 따라서 토양의 특성을 알기 위해서는 이들 요인들에 대한 영향을 파악하여야 한다. 일반적으로 토양 내의 금속원소 함량은 모암, 입도, 유기물 등의 영향에 민감한 것으로 알려져 있다(Förstner and Wittmann, 1981; Salomons and Förstner, 1984). 모암을 구성하는 물질에서 높은 함량을 보이는 금속원소는 토양에서도 높은 함량을 보이며, 물리적 특성에 의해 입도 세립화가 진행됨에 따라 금속원소의 흡착성이 뛰어나 자연적 부화(natural enrichment)가 나타난다. 따라서 토양오염은 토양형성에 영향을 주는 요인들을 파악하지 않고 절대적 금속원소의 함량으로 판별할 때에는 각별한 주의가 요구된다.

우리나라는 토양환경보존법에서 “사업 활동 기타 사람의 활동에 따라 토양이 오염되는 것으로 사람의 건강·재산이나 환경에 피해를 주는 상태”를 토양오염으로 정의하고 있으며, 이에 따른 토양오염 우려기준(soil contamination warning standards)과 대책기준(soil contamination countermeasure standards)을 제시하고 있다(환경부, 2007). 이는 토양 내 오염물질 함량에 의한 위해성 여부와 함께 인간 활동의 부산물로 인해 발생하는 인위적 부화(artificial enrichment)의 영향을 토양오염으로 정의한다 할 수 있다.

이에 본 연구는 토양환경보존법에 의한 토양 내 금속원소 함량에 따른 위해성 평가와 더불어 인간 활동에 의한 인위적 부화 정도를 파악하고자 조사 및 분석을 실시하였다. 연구 지역은 전라남도 함평군 전역을 조사대상지로 선정하여 토양의 근간을 이루는 암석의 지표지질조사를 실시하였으며, 암석 및 토양의 지화학적 분석을 실시하였다. 이러한 인위적 부화에 의한 금속원소 오염물질 평가는 토양환경보존법에 의한 토양환경 평가의 보완책으로 사용되어질 수 있을 것이다.

II. 시료채취 및 분석방법

연구지역 토양의 지구화학적 특성을 파악하기 위한 암석의 지표지질 조사 및 암석, 토양 시료 채취는 2005년 6월부터 8월에 시행하였다. 지표지질 조사는 이병주 외(1997)에 의한 광주도폭(1:250,000)과 1:25,000 지형도를 이용하여 연구지역에 노출되는 편마암, 천매암, 편상화강암, 사암, 실트암, 셰일, 응회암, 안산암의 노두들을 대상으로 암석 시료 채취와 암석 분포상을 조사하여 기재하였다.

한편, 토양시료는 표면의 잡초, 유기물 등의 이물질층을 제거한 후 3cm 이내의 표토층을 채취하였다. 토양시료 채취시 지구화학적 분석에 따른 금속 기기에 의한 오염을 최소화하기 위해 플라스틱 삽을 이용하였다. 이 때 조사대상지역의 대표성을 유지하기 위해 GPS(Global Positioning System)로 정확한 정점을 표기하였으며, 중심부 1개와 주변 4방위 약 5 m 4개 지점(채취 주변의 면적이 넓은 경우 약 10m, 오차 ±50cm)에서 균질하게 채취하여 고밀도 폴리에틸렌병(HDPE bottle)에 담아 하나의 완전시료로 사용하였다(Figure 1). 또한 현장에서 채취한 토양 시료는 휘발성 물질, 이물질 등의 유입에 따른 인위적 영향을 줄이기 위하여 자연 건조시켰다.

암석 및 토양 시료의 분석 방법은, 주성분 원소의 경우, XRF(Shimadzu XRF - 1700)를 이용하였으며, 전류 및 전압 조건은 40KV와 30mA이며 로듐 타겟(Rh target)을 사용하여 X선을 주사하여 분석하였다. 이 때, 글래스 비드(glass bead) 시편은 시료 0.6g에 용제인 Li₂B₅O₇(lithium tetraborate) 6g을 혼합하여 제작하였고, 검량선을 작성하여 정량하였다. 미량원소는 ICP-MS(Perkin-elmer sciex)를 이용하여 시료 약 0.1g을 취하여 HNO₃:HF:HClO₄의 혼합비를 2:1:1로 한 혼합산을 첨가하여 반응시킨 후, HNO₃+HClO₄(1:1)로 추가 반응하여 완전 용액화 시킨 후 20g으로 평량하여 측정하였다. 또한, 원소 분석시에는 자료의 신뢰도를 검증하기 위해 중복분석과 미국표준기술연구소(NIST)의 표준시료(RM 8704; buffalo river sediment)를 병행분석 하였으며, 그 결과 측정값의 정밀도는 ±5%(반복측정의 상대표준편차), 정확도는 -7%~13%(표준시료 RM 8704에 대한 상대오차)로 나타났다.

토양 입도분석은 시료를 20~30g 정도 취하여 과산화수소(H₂O₂)와 묽은 염산(HCl)으로 유기물과 탄산염을 제거한 후, Ingram(1971)과 Galehouse(1971)의 방법에 따라 건조기에서 충분히 건조시켜 사질과 니질 부분으로 분리하였다. 사질 토양의 입도는 표준체를 이용한 건식체질(dry sieving) 방법을, 니질 토양은 침전속도를 이용한 피펫법(pipetting method)으로 토양의 입도별 함량을 구하였다.

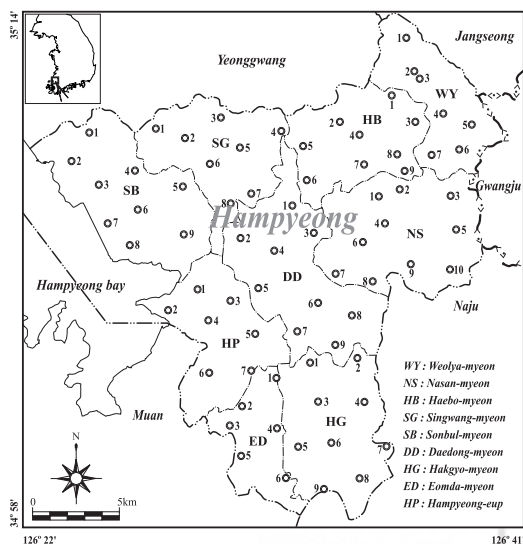


Figure 1. Map showing the study area and soils sampling sites

III. 결과 및 토의

1. 지표 지질과 토성

1) 변성암류

연구지역에 분포하는 선캠브리아기의 편마암류들은 화강편마암(Granite Gneiss)과 반상변정편마암(Porphyroblast Gneiss)을 주로 하며, 함평군의 서측인 손불면의 남측과 함평읍의 해안에 접한 북서부에 협소하게 분포하였다(Figure 2). 화강암질 편마암은 연구지역의 기반암으로 북동-남서 방향

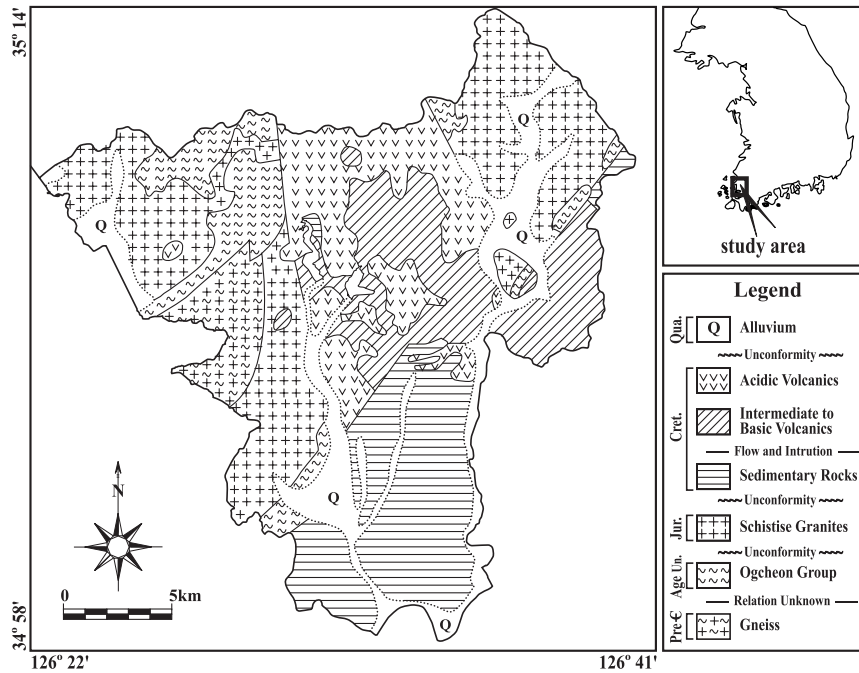


Figure 2. The geological map in the study area(modified after ; Lee et al., 1997)

의 방향성을 보이며, 반상변정편마암으로 이화된다. 외관상 화강암과 매우 유사한 모습을 갖추고 있으며, 엽리(foliation)가 뚜렷하게 전개되지는 않았다. 반상변정편마암은 함평읍 일대에 주로 분포하며, 화강암질편마암과 점이적인 변화상을 보였다. 엽리의 발달이 분명하며 칼리장석으로 된 반상변정들이 뚜렷하게 관찰되었다. 또한, 선캠브리아기의 편마암류와 접촉하는 시대미상인 천매암과 운모편암 등의 저변성 변성암류들은 함평군 신광면, 손불면의 남부 일부, 함평읍과 엄다면 경계부, 월야면 남측 일부, 해보면 북동측 일부에 북동-남서의 방향성을 보이며 분포하였다. 이들 변성암류들은 쥐라기의 편상화강암류에 의해 관입당하고 있으며, 암상의 특성 상, 옥천층군의 서남 연장부에 해당되는 것으로 보고 있다(이병주 외, 1997).

2) 쥐라기 화강암류

편상 엽리가 잘 발달한 흑운모 화강암에 속하는 암석으로 함평군에서는 손불면, 함평읍, 월야면, 해보면 지역에 주로 분포하고, 다른 지역에서는 매우 협소하게 노출되어 있다. 비교적 조립인 등립상의

석영, 장석류, 흑운모, 각섬석 등을 주로 하며 일부 변질에 의한 것으로 보이는 견운모도 관찰되었다. 흑운모는 열수변질로 추정되는 변질에 의하여 녹니석화 작용을 받아 많은 경우 녹갈색에서 암록색을 보였다. 이들 암체 내에서는 일부 거정질의 화강암질 페그마타이트(pegmatite)가 관입하는 경우도 있으며, 이 흑운모화강암의 편상 엽리는 암쇄 엽리에 해당하는 것으로 알려져 있다.

3) 백악기 경상누층군

함평군 지역에 가장 넓게 노출되는 암석들이 중생대 백악기에 이루어진 경상누층군에 해당하는 화산성 쇄설암류의 퇴적암류, 안산암을 주로 하는 중성 및 염기성 화산암류, 유문암 등의 산성화산암류이다. 퇴적암류는 대동면 남동부, 학교면과 엄다면의 대부분 지역들에 분포하며 월야면에도 작은 노출지가 있다. 이들 퇴적암류는 청회색, 담회색의 응회암류와 응회암질 사암을 주를 이루고, 자색의 실트암과 셰일 등이 협재되고 있다. 응회암류, 사암, 실트암 등은 대부분 자색을 띠며, 적색층(red bed)을 보였다.

안산암은 함평군에서 가장 넓게 분포하는 암석으로 중성 및 염기성 화산암류의 대부분을 이루고 있다. 안산암류는 많은 경우 용류했던 것으로 보이나 일부는 암맥상으로 관입하기도 하였다. 외관상 안산암들은 녹회색 내지 담록색을 띠며 세립질인 경우가 많으나, 대동면 부근에서는 암록색을 띠고 치밀한 외관으로 열수에 의한 변후안산암화작용(prophyllitization)이 진행되었던 것으로 보인다.

산성화산암류는 해보면 서부, 신광면 동부, 대동면 북부 지역들에서 산출되며 유문암(rhyolite)을 주로 하고 규장암(felsite) 등을 포함하는 산상을 보였다. 유문암은 밝은 외관을 가지기도 하나 자색을 띠는 경우도 있다.

4) 층적층

함평군의 해안이나 하천 주변 등의 저지에는 신생대 제4기의 미고결된 자갈, 모래, 니 등으로 이루어진 퇴적층이 전술한 모든 암체들을 부정합적인 관계를 가지며 퇴적되어져 있다.

5) 토성

토양은 여러 가지 형상과 크기의 암석 및 광물입자와 소량의 유기물과의 혼합물이며, 토양의 성질에 따라 토양의 생산력, 발달, 무기 및 유기물질의 투과성을 결정한다. 특히, 입도에 따른 토성은 모래, 미사, 점토의 상대적 비율로 토양의 여러 가지 성질을 결정하는 기본적인 요인이 된다(임선옥,

1992). 토양의 모래, 미사, 점토의 3성분을 알면 토성 삼각도에 따라 토성을 결정할 수 있다.

연구지역에서 채취된 토양을 대상으로 조직특성을 살펴보기 위하여 미국 농무성(USDA, 1975)이 제시한 기준삼각도를 이용하여 토양을 분류하였다(Figure 3). 그 결과, 모래가 주성분인 사질 토양(sandy soil)은 사토(sand), 양질사토(loamy sandy soil), 사양토(sandy loam)로, 미사가 주성분인 미사질 토양(loamy soil)은 사질식양토(sandy clay loam), 양토(loam)로, 점토가 주성분인 점토질 토양(clayey soil)은 식양토(clay loam), 미사질식토(silty clay), 식토(clay)의 9개 토성으로 나타났다.

사질토양은 대부분 함수율, 유기물 함량, 응집력이 낮으며, 배수 및 유기물 분해력은 빠르게 진행된다. 또한 오염물질을 대부분 하부로 빠르게 용탈되는 특성을 보인다(박병근 등, 1998). 이와 달리, 점토질 토양은 사질토양의 성질과 반대의 특성을 보이며, 오염물질은 하부로 거의 용탈되지 못하고 남게 되는 경향이 많으며, 미사토양은 점이적인 성격을 가진다. 연구지역에서 나타나는 토성은 모래의 함량이 85% 이상인 사토와 양질사토는 극히 일부이며, 대부분이 미사와 점토(50~95%)를 함유한 토성을 보였다. 이러한 토성은 함수율, 유기물 함량, 응집력을 높이며, 입도의 세립화와 유기물에 의해 중금속원소들이 흡착되도록 하는 특성을 보인다(Förstner and Wittmann, 1981; Salomons and

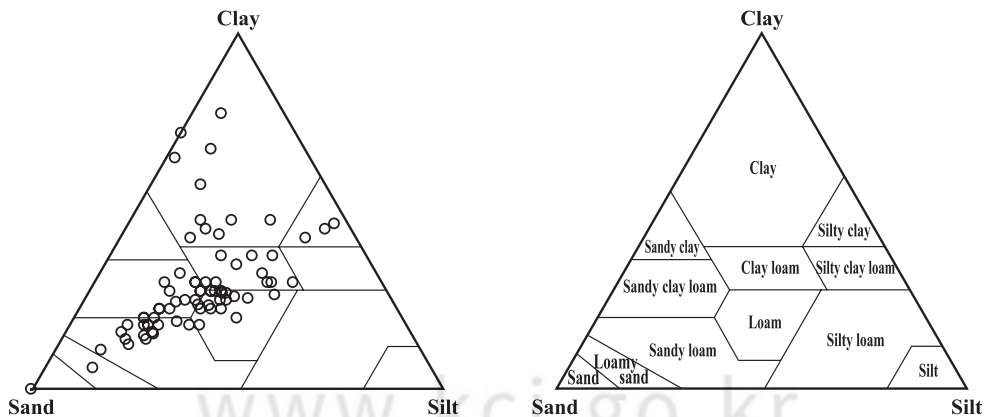


Figure 3. Triangular diagram showing texture of soils in the study area

Förstner, 1984; Irving and William, 1948; 오강호 등, 2003).

2. 암석과 토양의 지화학적 함량 특성

암석은 성인에 따라 크게 화성암, 퇴적암, 변성암으로 구분한다. Table 1은 연구지역에서 채취한 암석의 지화학적 함량을 성인에 따라 분류한 것으로, 화학 성분은 Mason and Moore(1982)에 의해 제시된 지각평균함량(crust mean value)과 비교할 때 많은 차이가 났다. 주성분원소 함량은 암석 성인에 따른 약간의 차이는 존재하지만 지각평균 함량에 비해 SiO₂ 1.03~1.27배(평균 1.17배), Fe₂O₃ 0.80~2.23(1.40), K₂O 0.75~1.29(1.04)로 높았으며, Al₂O₃ 0.71~1.04(0.89), TiO₂ 0.40~1.08(0.63), MgO 0.14~0.56(0.29), CaO 0.02~0.79(0.39), Na₂O 0.03~1.29(1.04)로 낮았다. 이와 달리, 미량원소는 주성분 원소에 비해 지각평균 함량과 큰 차이를 보였다. 지각평균 함량과 비교할 때, As 2.67~26.23(평균 6.64), Pb 1.57~5.81(2.30), Zn

0.56~1.62(1.07)로 높았으며, Cd 0.00~0.90(0.58), Co 0.09~0.44(0.25), Cr 0.04~0.54(0.19), Cu 0.06~0.31(0.18), Ni 0.02~0.21(0.10)로 낮았다.

Table 2는 토양의 지화학적 함량을 토성에 따라 분류한 것으로, 연구지역에서 분석한 암석평균함량(rock mean value)과 비교하였다. 주성분원소 함량은 Al₂O₃ 0.86~1.24배(평균1.10배), TiO₂ 0.71~1.97(1.52), Fe₂O₃ 0.53~1.71(0.91)로 암석평균함량 보다 높았으며, SiO₂ 0.86~1.07(0.95), MgO 0.32~1.51(0.91), CaO 0.18~1.31(0.32), Na₂O 0.06~1.31(0.32), K₂O 0.70~1.34(0.92)로 낮았다. 미량원소는 암석평균함량과 비교할 때 토성에 따른 함량차이가 있지만, As를 제외하고 높은 값을 보였다. 암석평균 함량에 비해 Cr 0.62~3.05(1.85), Co 0.53~2.07(1.32), Ni 0.57~3.86(2.31), Cu 0.58~2.22(1.62), Zn 0.72~1.42(1.14), Cd 0.00~4.73(1.62), Pb 0.90~1.34(1.06)로 높았고 As 만이 0.41~1.24(0.85)로 낮았다.

Table 1. Mean element contents of rocks in the study area

(unit in ¹%, ²mg/kg)

Element	Igneous rocks		Sedimentary rocks				Metamorphic rocks		Crust mean value
	granite (n=7)	Andesite (n=18)	sandstone (n=4)	siltstone (n=4)	shale (n=2)	tuff (n=3)	phyllite (n=3)	gneiss (n=1)	
¹ SiO ₂	73.08	60.90	75.40	70.59	63.72	74.35	69.09	66.81	59.30
¹ Al ₂ O ₃	12.68	15.99	10.89	12.94	14.27	12.94	13.97	15.11	15.36
¹ TiO ₂	0.32	0.79	0.39	0.37	0.36	0.29	0.70	0.48	0.73
¹ Fe ₂ O ₃	2.65	5.81	3.06	2.94	3.86	2.07	5.57	3.26	2.60
¹ MgO	0.55	1.93	0.71	1.12	1.08	0.49	1.18	0.98	3.46
¹ CaO	1.65	4.00	0.99	1.81	3.49	0.79	0.09	3.07	5.08
¹ Na ₂ O	2.50	2.90	1.59	2.12	2.07	2.71	0.11	3.55	3.81
¹ K ₂ O	3.68	2.95	2.35	3.21	4.04	3.16	3.01	3.60	3.12
² Cr	3.82	15.60	17.91	22.28	20.90	8.05	54.04	8.97	100
² Co	6.81	11.12	5.11	4.65	5.97	2.36	7.19	6.76	25
² Ni	1.65	6.90	6.03	9.31	11.48	2.09	16.07	4.10	75
² Cu	4.53	13.81	16.82	7.35	10.51	8.37	15.31	3.04	55
² Zn	64.59	113.42	39.34	67.02	93.14	46.41	112.13	64.42	70
² As	5.77	8.01	7.53	8.12	47.22	4.81	5.49	8.62	1.8
² Cd	0.13	0.17	0.14	0.18	0.13	0.11	0.07	0.00	0.2
² Pb	75.54	20.90	24.89	23.98	25.34	22.47	25.71	20.40	13

Table 2. Mean element contents of soils in the study area (unit in %, ²mg/kg)

Element	Sandy soils			Loamy soils			Clayey soils			Rock mean value
	S (n=1)	IS (n=1)	sL (n=17)	L (n=18)	sCL (n=13)	cL (n=11)	C (n=11)	zC (n=3)	sC (n=1)	
¹ SiO ₂	63.54	66.03	66.67	65.98	65.86	66.74	63.16	59.71	74.00	69.24
¹ Al ₂ O ₃	16.41	14.17	15.85	14.23	15.20	13.94	16.30	16.87	11.63	13.60
¹ TiO ₂	0.87	0.47	0.55	0.83	0.67	0.82	0.89	0.91	0.33	0.46
¹ Fe ₂ O ₃	5.80	3.02	3.50	4.74	4.42	4.63	5.54	6.25	1.93	3.65
¹ MgO	1.48	1.03	0.63	0.89	0.73	0.82	0.84	1.52	0.32	1.01
¹ CaO	0.35	2.85	0.45	0.89	0.69	0.83	0.45	1.15	0.49	1.99
¹ Na ₂ O	0.39	2.87	0.56	0.49	0.29	0.40	0.13	0.64	0.59	2.19
¹ K ₂ O	2.66	3.50	3.56	2.63	2.90	2.39	2.28	2.53	4.35	3.25
² Cr	24.11	11.75	23.41	37.94	38.91	50.93	57.22	57.77	12.73	18.95
² Co	10.49	3.31	6.16	9.50	8.31	8.70	11.40	12.94	3.54	6.25
² Ni	16.29	4.10	13.81	19.47	17.45	18.12	27.78	25.15	7.89	7.20
² Cu	11.92	5.83	13.75	18.11	17.35	22.17	22.17	19.90	14.08	9.97
² Zn	87.68	54.23	97.17	85.62	106.59	92.74	94.94	89.98	64.02	75.06
² As	7.58	4.84	9.37	14.08	11.62	10.02	10.47	8.37	14.76	11.95
² Cd	0.00	0.00	0.31	0.20	0.16	0.28	0.55	0.19	0.00	0.12
² Pb	31.75	34.50	39.98	27.56	30.36	30.90	31.01	26.81	31.41	29.90

S: sand, IS: loamy sand, sL: sandy loam, L: loam, sCL: sandy clayey loam, cL: clayey loam, C: clay, zC: silty clay, sC: sandy clay

3. 금속원소의 토양환경평가

1) 토양환경평가 방법

우리나라는 토양환경보전법에 의해 Cu, Zn, As, Cd, Pb 등의 중금속 비롯한 총 16종의 토양 오염물질 평가를 토양오염 우려기준과 대책기준으로 구분하여 관리하고 있다(환경부, 2007). 또한 토양오염 우려기준과 대책기준을 가지역(전, 답, 과수원, 목장용지, 임야, 학교용지, 하천 등)과 나지역(공장용지, 도로, 철도용지, 잡종지 등)으로 구분하여 오염물질 항목별 기준치를 별도로 설정하고 있다.

토양은 암석의 풍화물로 모암의 구성성분에 따라 달라지며, 모암의 구성물질에 가장 큰 영향을 받고 있다. 또한, 물리적 특성에 의해 입도가 세립질로 변화해 감에 따라 금속원소의 흡착성이 뛰어나 자연적 부화가 나타난다. 따라서 항목별 위해성에 따른 평가와 더불어 인간 활동의 부산물로 인해 인위적으로 발생하는 인위적 부화의 영향 정도도 파악되어야 할 것이다. 이를 위해서는 토양오염물질들에 대한 자연적 부화의 영향을 최소화 한 후, 인

위적 영향의 정도를 파악해야 한다.

지금까지 토양이나 퇴적물 내 금속원소 부화 평가방법은 여러 연구자들에 의해 다양한 방법이 시도되었다. 가장 많이 사용되는 평가방법에는 부화지수(enrichment factor; EF), 농축지수(index of geoaccumulation; I_{geo}), 농 축 부 화 비 (concentration enrichment ratios: CER), 오염지수(contamination index; CI) 등이 있다 (Bruland *et al.*, 1974; Müller, 1979; Prusty *et al.*, 1994; Sutherland, 2000). 이 중 부화지수는 지각평균함량의 금속원소 구성비율을 기준으로 토양이나 퇴적물 내 금속원소의 함량변화를 이용한 부화 정도를 평가하는 연구에 많이 사용되어지고 있다(신상은 등, 2005; 이종현 등, 1998; 오강호, 2002; 오강호 등, 2003; Bruland *et al.*, 1974; Salomons and Förstner 1984). 이 때 부화지수에 사용되는 보존성원소로 Al을 들 수 있다. Al은 기원이 대부분 지각물질로 점토광물의 주성분으로서 환경변화에 비교적 안정되어 있으며, 입도에 따라 비교적 일정하게 함량이 변화하는 특성을 보인다

(Bruland *et al.*, 1974; Windom *et al.*, 1989). 또한 지각평균함량은 세계적 평균치인 Clarke의 지각평균함량(Mason and Moore, 1982)을 사용한다(식 1).

$$EF = \frac{Metal_{(soil)} / Metal_{(crust)}}{Al_{(soil)} / Al_{(crust)}} \quad (1)$$

본 연구에서는 금속원소 부화 평가방법으로 Bruland *et al.*(1974)에 의한 부화지수를 변형하여 사용하였다(식 2). 변형된 부화지수는 지각평균함량 대신 연구지역 암석평균함량(rock mean value : rmv)과 금속원소별 표준편차(standard deviation : sd)를 기준으로 하였으며, 보존성원소로는 입도에 따라 비교적 일정하게 함량 변화를 보이며, 시료별 상대적 함량 변화 편차가 작은 Al을 사용하였다(식 2).

$$EF = \frac{Metal_{(soil)} / Metal_{(rmv+sd)}}{Al_{(soil)} / Al_{(rmv+sd)}} \quad (2)$$

2) 평가방법의 타당성 검증

자연적 요인에 의한 토양 내 금속원소 부화 영향을 줄이고, 인위적 영향을 파악하기 위해서는 자연

적 부화에 의한 영향을 최소화 시켜야 한다. 이를 위해서는 배경값(background value)의 설정이 중요하다. 즉 연구지역에서 채취한 모암의 화학성분 평균값을 배경값으로 사용하기 위해서는 암석 성인에 따른 금속원소 함량의 차이가 없어야 한다.

Table 3은 연구지역 암석의 평균함량을 배경값으로 사용할 수 있는지를 살펴보기 위하여, SPSS를 이용하여 유의미한 차이가 있는지 T-검정(p<0.05)을 실시한 결과이다. Levene의 등분산 검증에 의한 성인에 따른 금속원소 평균의 동일성에 대한 t-검증 결과, Co를 제외한 금속원소들이, 등분산 여부에 관계없이 유의확률 p>0.05 이상으로 평균의 차이가 없는 것으로 나타났다. 따라서 Co를 제외한 금속원소 함량은 암석 성인에 따른 평균함량 차이가 존재하지 않는 것으로 배경값으로 사용하기에 적합하다 할 수 있다. 한편, 암석평균함량도 절대적 기준으로 표준오차를 내포하고 있기에 이에 따른 일부 보정을 하였다. 즉, 암석평균함량의 오차를 줄이기 위한 방법으로 암석평균함량에 금속원소별 표준

Table 3. Independent samples t-test of minor elements in rock

	Igneous rock vs Sedimentary rock						Sedimentary rock vs Metamorphic rock					Igneous rock vs Metamorphic rock				
	Levene's Test for Equality of Variances		T-test Equality of Means				Levene's Test for Equality of Variances		T-test Equality of Means			Levene's Test for Equality of Variances		T-test Equality of Means		
	F	Sig.	t	df	Sig.	F	Sig.	t	df	Sig.	F	Sig.	t	df	Sig.	
Cr	EVA	0.03	0.87	-0.88	36.00	0.38	4.15	0.06	-2.15	15.00	0.05	3.01	0.09	-2.71	27.00	0.01
	EVNA			-0.94	29.51	0.35			-1.39	3.32	0.25			-1.68	3.25	0.18
Co	EVA	15.02	0.00	2.21	36.00	0.03	1.88	0.19	-1.48	15.00	0.16	8.27	0.01	0.65	27.00	0.52
	EVNA			2.81	34.33	0.01			-2.02	9.86	0.07			1.47	24.02	0.15
Ni	EVA	0.31	0.58	-0.63	36.00	0.53	0.10	0.76	-1.39	15.00	0.19	0.37	0.55	-1.92	27.00	0.07
	EVNA			-0.62	24.05	0.54			-1.20	4.17	0.29			-1.56	3.58	0.20
Cu	EVA	0.11	0.74	0.06	36.00	0.95	0.14	0.71	-0.19	15.00	0.85	0.05	0.83	-0.19	27.00	0.85
	EVNA			0.06	21.75	0.95			-0.21	5.91	0.84			-0.19	4.12	0.86
Zn	EVA	1.52	0.23	1.36	36.00	0.18	11.95	0.00	-1.46	15.00	0.17	0.21	0.65	-0.01	27.00	0.99
	EVNA			1.84	28.51	0.08			-0.82	3.11	0.47			-0.01	4.17	0.99
As	EVA	11.56	0.00	-1.75	36.00	0.09	1.38	0.26	0.83	15.00	0.42	1.10	0.30	0.68	27.00	0.50
	EVNA			-1.28	12.41	0.22			1.42	14.77	0.18			0.56	3.60	0.61
Cd	EVA	2.02	0.16	0.17	36.00	0.86	0.08	0.78	1.76	15.00	0.10	0.54	0.47	0.56	27.00	0.58
	EVNA			0.23	28.48	0.82			1.64	4.54	0.17			1.20	20.10	0.25
Pb	EVA	5.33	0.03	0.94	36.00	0.36	1.64	0.22	-0.04	15.00	0.97	0.90	0.35	0.50	27.00	0.62
	EVNA			1.27	27.57	0.21			-0.03	3.50	0.98			0.92	11.01	0.38

(EVA: equal variances assumed, EVNA: equal variances not assumed)

편차를 포함하여 배경값으로 이용하였다.

토양은 입도가 물리적 특성에 의해 입도가 세립해 짐에 따라 금속원소의 흡착성이 뛰어나 자연적 부화가 일어난다, Table 4는 연구지역에서 입도의 영향을 파악하기 위해 입도에 따른 사질 토양, 미사질 토양, 점토질 토양의 유의미한 차이가 있는지 실시한 결과이다. 그 결과, Ni는 사질 토양, 미사질 토양, 점토질 토양과의 각각의 관계에서 평균의 유의미한 차이(p<0.05)가 나타났다. 또한, Cr, Co, Cu의 금속원소는 조립질의 사질 토양에 비해 미사질 토양과 점토질 토양에서, Cd는 미사질 토양에 비해 점토질 토양에서 평균함량의 차이가 유의미하게 높았다. 이는 토양 입도의 영향이 금속원소 부화에 관여하는 것으로, 금속원소 부화를 평가하기 위한 입도의 영향을 제어할 필요성이 있다. 이에, 금속원소 중 인위적 부화의 영향이 작고 입도의 영향에 민감한 Al을 보존성원소로 이용하였다.

3) 연구지역 토양환경평가

Figure 4는 연구지역 토양을 대상으로 중금속 함량에 따른 토양환경보존법에 따른 위해성과 인위적 부화 정도를 나타낸 것이다. 토양환경보존법에서 정한 토양오염 우려기준(soil contamination warning standards: scws)과 대책기준(soil contamination countermeasure standards: sccs)으로 살펴본 결과, As를 제외한 대부분 중금속들은 토양오염 우려기준 이하의 평균값을 보였으며, Cu, Zn은 미사질 토양에서, Pb는 사질 토양에서 일부 토양오염 우려기준으로 나타났다. 특히 As는 대부분 토양에서 토양오염 우려기준을 초과하여, 일부 지역에서는 최대 75mg/kg으로 토양오염 대책기준에 해당하는 것으로 나타났다. 한편, 인위적 영향을 평가하기 위해 구한 부화지수는 Ni, Cu를 제외한 대부분의 금속원소는 평균 1 이하를 보였다. Ni는 사질 토양에서 평균 1.08, 미사질 토양 1.54, 점토질 토양 1.93으로, Cu는 미사질 토양과

Table 4. Independent samples t-test of minor elements in soil

		Sandy soil vs Loamy soil					Loamy soil vs Clayey soil					Sandy soil vs Clayey soil				
		Levene's Test for Equality of Variances		T-test Equality of Means			Levene's Test for Equality of Variances		T-test Equality of Means			Levene's Test for Equality of Variances		T-test Equality of Means		
		F	Sig.	t	df	Sig.	F	Sig.	t	df	Sig.	F	Sig.	t	df	Sig.
Cr	EVA	1.35	0.25	-3.32	59.00	0.00	0.02	0.88	-1.90	55.00	0.06	2.23	0.14	-5.35	32.00	0.00
	EVNA			-3.99	54.16	0.00			-1.99	27.12	0.06			-5.10	23.22	0.00
Co	EVA	0.10	0.75	-3.58	59.00	0.00	4.41	0.04	-2.42	55.00	0.02	1.90	0.18	-4.06	32.00	0.00
	EVNA			-3.44	31.62	0.00			-1.96	18.11	0.07			-3.90	24.17	0.00
Ni	EVA	0.74	0.39	-2.82	59.00	0.01	0.19	0.67	-3.93	55.00	0.00	0.05	0.82	-4.63	32.00	0.00
	EVNA			-2.50	26.91	0.02			-3.42	19.87	0.00			-4.64	30.59	0.00
Cu	EVA	0.09	0.76	-2.51	59.00	0.01	1.12	0.29	-0.94	55.00	0.35	0.78	0.38	-3.37	32.00	0.00
	EVNA			-2.64	39.35	0.01			-1.11	36.05	0.27			-3.47	32.00	0.00
Zn	EVA	0.41	0.53	0.03	59.00	0.98	2.98	0.09	0.15	55.00	0.88	5.49	0.03	0.16	32.00	0.87
	EVNA			0.03	31.80	0.98			0.23	53.24	0.82			0.18	20.76	0.86
As	EVA	2.22	0.14	-1.14	59.00	0.26	1.77	0.19	0.62	55.00	0.54	0.00	0.95	-0.80	32.00	0.43
	EVNA			-1.49	58.99	0.14			0.92	54.98	0.36			-0.83	32.00	0.41
Cd	EVA	0.76	0.39	0.84	59.00	0.40	2.26	0.14	-2.99	55.00	0.00	4.68	0.04	-1.89	32.00	0.07
	EVNA			0.83	33.37	0.41			-3.18	27.87	0.00			-1.93	31.85	0.06
Pb	EVA	4.32	0.04	1.89	59.00	0.06	1.20	0.28	-0.44	55.00	0.66	2.13	0.15	1.06	32.00	0.30
	EVNA			1.31	18.83	0.21			-0.55	39.57	0.59			1.19	18.91	0.25

(EVA: equal variances assumed, EVNA: equal variances not assumed)

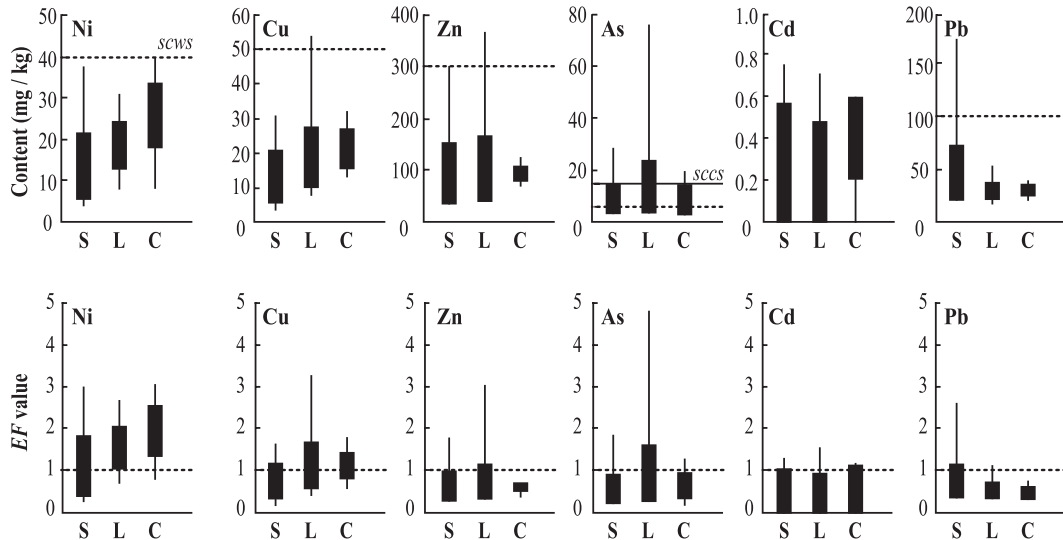


Figure 4. Contents and enrichment factor(EF) of metallic elements in the study area(scws : soil contamination warning standards, sccs : soil contamination countermeasure standards, S : Sandy soils, L : Loamy soils, C : Clayey soils)

점토질 토양에서 평균 1.10으로 부화되었다. 이와 달리 As는 인위적인 부화의 정도가 1 이하로 낮게 나타났다.

As의 경우, 위해성과 인위적 부화가 상이하게 나타나는 것은 연구지역의 지질 특성에 따른 결과로 판단된다. As는 지각평균함량이 1.8mg/kg 정도이나(Mason and Moore, 1982), 세일에서는 평균 13mg/kg의 값을 보인다(최석원과 김억수, 1996). 즉 연구지역에서 As가 대부분 토양에서 토양오염 우려기준을 초과하는 것은 주 구성 암석인 세일에 의한 지질 특성을 반영한 것이며, 부화지수가 1 이하의 값을 보이는 것은 암석평균함량을 배경값으로 사용한 결과라 할 수 있다.

또한, 이러한 결과는 Cu, Zn, Pb 등에서도 일부 나타난다. 즉 토양환경보존법에 따른 위해성에서는 토양오염 우려기준을 초과하지만, 부화지수는 1 이하의 값을 보인다. 따라서 이러한 결과는 인위적 오염에 의한 요인보다 주변 지질의 영향을 비롯하여 입도, 토양의 산성화, 유기물에 의한 오염 요인 등이 복합적으로 반영되어진 결과로 보는 것이 더 타당하다 할 수 있다(Förstner and Wittmann, 1981; Salomons and Förstner, 1984; Irving and William, 1948).

따라서 토양환경평가를 위해서는 토양환경보존법에 따른 위해성과 인위적 부화 정도를 함께 파악할 필요가 있다. 토양환경평가는 사람의 건강, 재산, 환경에 피해를 주는 것으로, 토양 내 유해 원소들의 함량에 따른 위해성이 있을 경우 적절한 대책이 강구되어야 한다. 또한 그 원인이 자연적 현상에 의한 것인지 아니면 인간 활동의 부산물에 의한 인위적인 것인지를 파악할 필요가 있다. 이를 통해 위해성에 따른 토양환경 관리와 더불어 인위적 요인에 따른 토양환경 보존 및 복원을 할 수 있으며, 차별화된 토지이용이나 관리를 위한 상호보완적인 관계라 판단되기 때문이다.

한편, Figure 5는 연구지역에서 금속원소들의 함량 및 부화에 대한 정도를 효과적으로 파악하기 위하여, 토양환경오염에 민감한 Cu, Zn, As, Cd, Pb를 대상으로 암석, 토양 내 함량 분포와 토양에서의 부화 정도를 공간적으로 표기한 것이다. 암석 내 금속원소의 함량분포의 경우 Cu, Zn, Cd는 연구지역 중심부인 대동면 부근에서, As는 남쪽의 엄다면과 학교면 경계에서, Pb는 북서부의 손불면 부근에서 높은 농도를 보였다. 토양 내 금속원소 함량은 Cu는 나산면 부근, Zn은 손불면과 대동면 부근, As는 함평읍 부근, Pb는 손불면 부근에서 높은 농도를 보

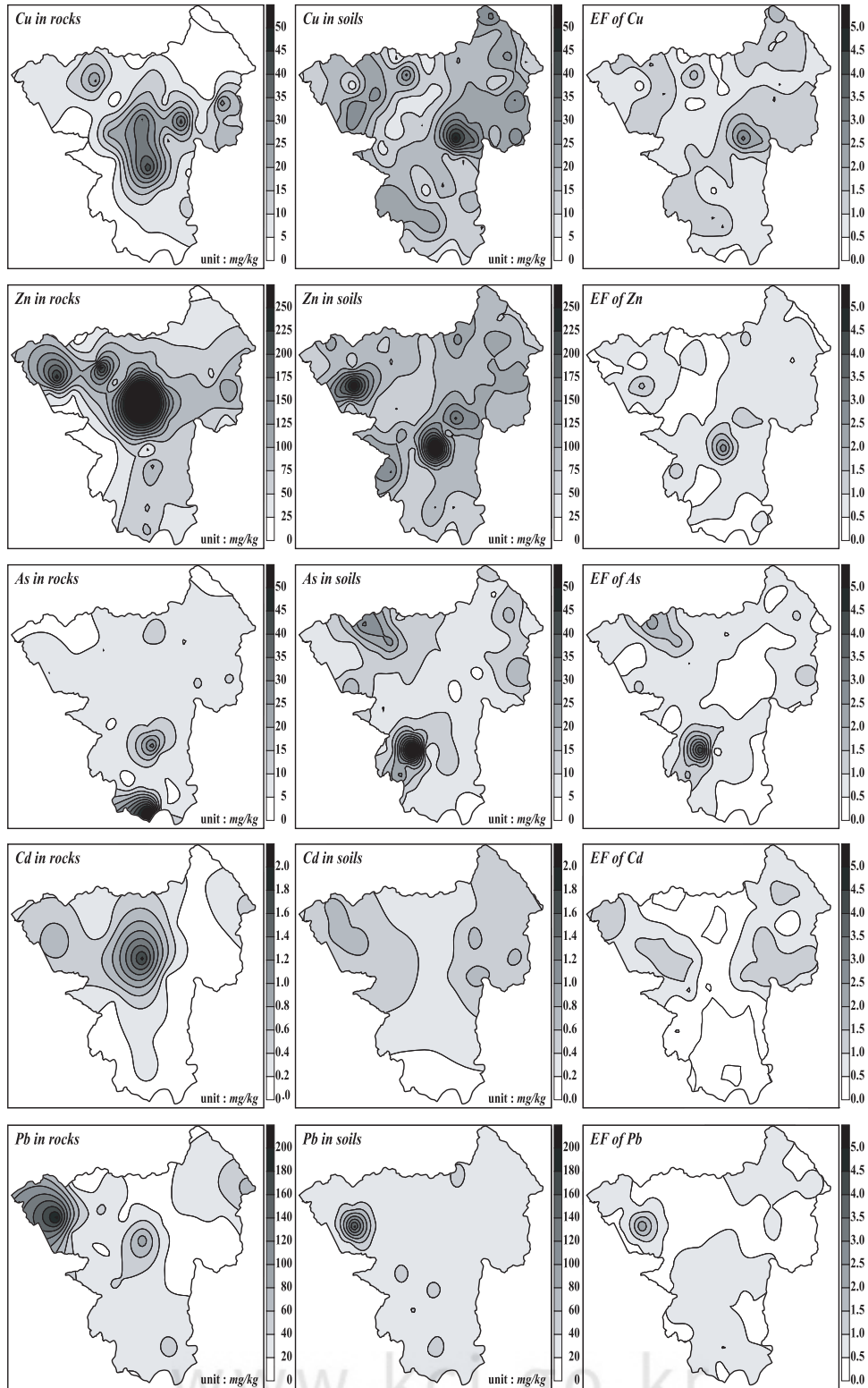


Figure 5. Spatial distributions of minor elements for the rocks, soils and EF

였다. 부화지수의 공간적 분포는 Cu, Zn, As, Cd는 토양의 함량이 높은 지역에서 부화되는 특성을 보였으며, Pb는 암석 및 토양의 농도가 높은 지역에서 부화되는 특성을 반영하였다.

이와 더불어, 본 연구에서는 유기물 함량 등에 의한 인위적 요인에 대한 분석을 실시하지는 않았지만, 연구지역에서 나타나는 부화지수 공간 분포로 추론할 수 있다. 연구지역은 나주평야에 해당하는 곳으로 대체적으로 평탄한 지형을 보이나, 북부에서 중심부에 이르는 대동면 지역은 산악지대로 이루어져 경작 및 경제활동 다른 지역에 비해 적은 지역이다. 이와 달리 북서 지역은 함평만을 중심으로 어업 및 답작이 이루어지고 있으며, 남서부는 함평군의 중심부로 관내 거주 인구가 가장 많은 함평읍이 위치한다. 또한 동부와 남동부는 나주평야에 해당하는 평지로 대단위 답작이 이루어지고 있다. 이 지역들은 상대적으로 인간에 의한 인위적 영향을 받는 곳으로 북부에서 중심부에 이르는 지역과는 토양환경의 차이가 존재할 가능성을 시사한다.

IV. 결 론

본 연구는 토양환경보존법에 의한 금속원소들의 위해성 평가와 더불어 인간 활동에 의한 인위적 부화 정도를 파악하고자 조사 및 분석을 실시하였다. 연구지역에서 산출되는 암석은 변성암의 편마암, 천매암, 퇴적암의 사암, 실트암, 셰일, 응회암, 화성암의 화강암, 안산암 등이 분포하였다. 암석들의 성인에 따른 금속원소 평균 함량은 유의미한 차이가 나타나지 않았다. 토성은 S, IS, sL의 사질 토양, L, scL, cL의 미사질 토양, C, zC, sC의 점토질 토양이 분포하였다. 토성에 따른 금속원소 Ni, Cr, Co, Cu의 평균 함량은 미사질 토양과 점토질 토양이 사질 토양보다 유의미하게 높았으며, Ni, Zn, Cd는 점토질 토양이 미사질 토양보다 높게 나타나 입도에 따른 영향을 반영하였다. 한편, 연구 지역 토양 내 금속원소는 Cu, Zn이 미사질 토양에서, Pb는 사질 토양에서 일부 토양오염 우려기준의 값을 보였

으며, As는 토양오염 우려기준을 초과하여, 최대 75mg/kg으로 토양오염 대책기준에 해당하는 것으로 나타났다. 또한 인위적 영향의 정도를 파악하기 위해 구한 토양의 부화지수는 Cr, Ni, Cu가 1 이상의 값으로 부화되었으며, 나머지 금속원소는 평균 1 이하로 나타났다. 토양환경오염의 정도를 파악하기 위해서는 인위적 영향을 대상으로 토양환경 평가가 이루어질 필요성이 있다. 또한 평가의 기준은 사람의 건강, 재산, 환경에 피해를 주는 상태로, 인위적 요인과 함께 위해성 요소가 고려되어야 할 것이다. 이러한 인위적 요인과 위해성에 의한 금속원소 오염물질평가는 토양환경보존법에 의한 상호보완이 가능할 것으로 여겨지며, 차별화된 토지이용이나 관리를 위해 필요할 것으로 생각된다.

사 사

이 논문은 2006년도 전남대학교 연구년 교수연구비 지원에 의하여 연구되었으며, 연구비를 지원하여 주신 전남대학교에 감사드립니다.

참고문헌

- 박병근, 허달재, 이기상, 이상호, 1998, 토양학, 지구문화사.
- 신상은, 오강호, 김주용, 2005, 광주광역시 토양의 지화학적 거동 특성과 오염, 환경영향평가, 14, 415-425.
- 이종현, 이정석, 김범수, 이창복, 고철환, 1998, 경기만 퇴적물의 중금속 분포 특성. 바다, 3, 103-111.
- 오강호, 2002, 영산강 유역 퇴적환경과 하천수 및 퇴적물의 오염, 전남대학교 박사학위논문.
- 오강호, 김주용, 고영구, 윤석태, 신상은, 박배영, 문병찬, 김해경, 2003, 광주광역시 하천의 표층퇴적물에 대한 지구화학적 특성과 오염, 한국지구과학회지, 24, 346-360.
- 이병주, 김정찬, 김유봉, 조동룡, 최현일, 전희영, 김복철, 1997, 광주지질도폭설명서, 한국자원

- 연구소, 과학기술부.
- 임선옥, 1992, 토양학통론, 문운당, 서울.
- 최석원, 김억수, 1996, 의학환경지구화학, 도서출판 춘광.
- 환경부, 2007, 토양환경보전법령집, 환경부
- 환경부, 2008a, <http://tmdl.nier.go.kr/>
- 환경부, 2008b, <http://www.airkorea.or.kr/>
- 환경부, 2008c, 기후변화대응 종합계획, 환경부
- Alloway, B. J., 1995, Heavy metals in soils (2nd ed.), Chapman & Hall, Glasgow.
- Bowen, H. J. M., 1979, Environmental Chemistry of the elements, Academic Press, London.
- Bruland, K. W., Bertine, K., Koide, M., and Goldberg, E. D., 1974, History of metal pollution in southern California coastal zone, *Environmental Science and Technology*, 8, 425-432.
- Förstner, U. and Wittmann, G. T. W., 1981, Metal pollution in the aquatic Environment, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Förstner, U. and Wittmann, G. T. W., 1981, Metal Pollution in the Aquatic Environment, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Galehouse, J. S., 1971, Sedimentation analysis, in Carver, R. E.(ed.), Procedures in Sedimentary Petrology, Wiley-Interscience, New York, 69-94.
- Horowitz, A. J., 1991, A Primer on Sediment-Trace Element Chemistry, Lewis Publishers, Chelsea (MI).
- Ingram, R. L., 1971, Sieve analysis, in Carver, R. E. (ed.), Procedures in Sedimentary Petrology, Wiley-Interscience, New York, 49-68.
- Irving, H. and Williams, R., 1948, Order of stability of metal complexes, *Nature*, 162, 746-747.
- Jenny, H., 1941, *Factors of Soil Formation*, McGraw-Hill, New York, p. 281.
- Mason, B. and Moore, C. B., 1982, Principles of geochemistry, John Wiley & Sons Inc, New York.
- Müller, G., 1979, Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins-Verderungen Seit, *Umschau*, 79, 778-783.
- Prusty, B. G., Sahu, K. C., and Godgul, G., 1994, Metal contamination due to mining activities at the Zawar zinc mine, Rajasthan, India, 1. Contamination of stream sediments, *Chemical Geology*, 112, 275-291.
- Salomons, W. and Förstner, U., 1984, Metals in the Hydrocycle, Springer-Verlag, Berlin.
- Sutherland, R. A., 2000, Bed sediment associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii, *Environment Geology*, 39, 611-627.
- Thornton, I., 1983, Applied environmental geochemistry, Academic Press, London.
- USDA, 1975, Soil taxonomy, Agricultural Handbook No. 436, USDA, Washington D.C.
- Windom, H. L., S. J. Scropp, F. D. Calder, J. D. Ryan, R. G. Smith, J. L. C. Burney, F. G. Lewis, and C. H. Rawlinson, 1989, Natural trace metal concentrations in estuarine and coastal marine sediments of the southeastern United States, *Environmental Science and Technology*, 23, 314-320.
- Wittmann, G. T. W., 1983, Metal Pollution in the Aquatic Environment. Springer-Verlag, Berlin.