

남해-화개지역 1차 수계 하상퇴적토의 환경유해원소 분산특성

박영석¹ · 박대우^{1*} · 김종균² · 홍인희¹ · 임성태³

¹조선대학교 자원공학과, ²조선대학교 공동실험실습관, ³국립해양유물전시관

Dispersion Characteristics of Hazardous Elements for the Stream Sediments of Primary Channels in the Namhae-Hwagye area

Young Seog Park¹ · Dae Woo Park^{1*} · Jong Kyun Kim² · In Hee Hong¹ · Sung Tae Lim³

¹Dept. of Resource Engineering, Chosun University

²Center for Scientific Instruments, Chosun University

³National Maritime Museum

ABSTRACT

Dispersion characteristics and environmental impacts of the stream sediments were investigated and geochemical disaster in the Namhae-Hwagye area was predicted. Stream sediments having no possibility of contamination effect and representing drainage basins were collected. Major and hazardous elements concentrations were determined by XRF, ICP-AES and NAA analysis methods. Acid decomposition for the ICP-AES have been used HClO₄ and HF with 200°C heating at 1st and after that HClO₄, HF and HCl with 200°C heating at 2nd stage. Hazardous elements concentrations for the stream sediments in the Namhae area were Cu 5.66~168 ppm, Pb 18.0~40.7 ppm, Cr 21.6~147 ppm, Co 4.86~25.3 ppm. Hazardous elements concentrations for the stream sediments in the Hwagye area were Cu 16.4~41.2 ppm, Pb 26.5~37.5 ppm, Cr 79.6~153 ppm, Co 15.7~29.5 ppm. Concentration of Cu and Co in the stream sediments show a negative correlation with SiO₂ in all study area. According to E.I.(Enrichment Index) of stream sediments was not enriched in study area. And average E.I. was 0.35 (Namhae) and 0.56 (Hwagye) respectively. The stream sediments were enriched as in order of Pb > Cr > Co > Cu. And the average of Enrichment Factor (E.F.) was 0.46 to 2.84, respectively. E.F. concentration of Cu and Co were nearly similar enrichment characteristic but E.F. concentration of Cr were higher enrichment characteristic in Namhae than Hwagye area. Pb was highly enriched in all study area but the tolerable level that used to investigate the enrichment degree of hazardous elements, was not exposed to harmful hazardous elements.

Key words : Stream sediments, Hazardous elements, Dispersion, E.I., E.F.

요 약 문

남해-화개지역 하상퇴적토 환경유해원소들의 분산특성 및 환경유해성을 알아보고, 지구화학적 재해에 대해 예견하고자 한다. 하상퇴적토는 오염의 우려가 없고, 집수분지를 대표할 수 있는 시료를 채취하였다. XRD, XRF, ICP-AES, NAA를 이용하여 주성분원소 및 환경유해원소를 분석하였다. 산분해법은 1차로 HClO₄와 HF를 혼합하여 200°C에서 분해시킨 후, 2차로 HClO₄, HF, HCl를 혼합한 후 200°C에서 분해시켜 이를 1% HNO₃ 용액으로 만들었다. 남해지역 환경유해원소의 함량은 Cu 5.66~168 ppm, Pb 18.0~40.7 ppm, Cr 21.6~147 ppm, Co 4.86~25.3 ppm 범위이고, 화개지역에서는 Cu 16.4~41.2 ppm, Pb 26.5~37.5 ppm, Cr 79.6~153 ppm, Co 15.7~29.5 ppm 범위를 보였다. 상관분석에서는 하상퇴적토의 SiO₂ 함량이 높아질수록 구리(Cu)와 코발트(Co)의 함량이 감소하는 특징을 보였다. 연구지역의 E.I.는 비부화 되어 있으며, 평균값은 남해지역 0.35와 화개지역 0.56이었다. 조사대상 하상퇴적토들은 납 > 크롬 > 코발트 > 구리 순으로 부화되어 있으며, E.F.의 평균값은 0.46~2.84이다. E.F.값은 구리와 코발트에서 거의 비슷

*Corresponding author : ramese@nate.com

원고접수일 : 2007. 11. 27 게재승인일 : 2007. 12. 26

질의 및 토의 : 2007. 8. 29 까지

한 부화특성을 보이나, 크롬에서는 남해지역보다 화개지역에서 보다 큰 부화특성을 보인다. 납은 연구지역 모두에서 상당히 부화되어 있었지만, 토양 및 퇴적물의 환경오염 허용 한계치(tolerable level)을 이용하여 살펴본 결과에서는 환경유해원소의 오염에 특별히 노출되지 않는 것으로 판단된다.

주제어 : 하상퇴적도, 환경유해원소, 분산, E.I., E.F.

1. 서 론

지구는 다양한 형태의 지질과정을 통하여, 인간의 삶을 영위하는 데에 필요한 여러 가지 요소들을 제공하기도 하지만 한편으로는 다양한 형태의 지질 재해(geologic hazard)를 야기 시킴으로서 인간과 동식물에게 피해를 입히고 있다. 지질 환경에 의하여 유독 원소가 자연적으로 과도하게 농집 되거나, 필수원소가 지나치게 결핍되는 현상으로 발생하는 지구화학적 재해(geochemical hazard)는 오랜 시간에 걸쳐 사람이나 동식물에게 악영향을 누적시킬 뿐만 아니라, 눈에 잘 띄지 않고 서서히 진행되어 넓은 지역으로 확산되는 경우가 많아서 그 피해의 심각성이 더욱 크다고 할 수 있다(GNHPR, 2001).

최근의 하상퇴적도를 이용한 연구는 광역적인 지구화학적 조성뿐만 아니라, 지질집단별 지구화학적 특성 연구(박영석 등, 2002), 지질집단별 자연배경치 연구(박영석 등, 2003), 하상퇴적물의 중금속 오염현황과 거동특성 연구(염승준 등, 2004), 희토류 원소를 이용한 하상퇴적물의 기원지 연구(이승구 등, 2003) 등으로 연구의 범위가 확대되어 지고 있다.

토양은 암석의 풍화 산물이므로, 토양의 화학조성은 일차적으로 그 모암의 화학조성의 영향이 반영된다. 금속원소들의 배경값 자체가 높은 암석으로부터 형성된 잔류토양에서는 자연적으로 높은 금속원소들의 분포가 기대된다. 자연적인 조건 하에서 일부 토양은 식물에 독성을 미칠 수 있을 만큼 금속을 함유되기도 한다. 이는 모암이나 광체의 풍화나 산화에 의한 원소들의 이차분산에 의해 야기된다(전효택, 1995).

암석이나 토양중에 분포하는 원소들은 지표수 및 지하수 또는 대기에 의해 이동, 분산되면서 동식물의 성장에 영향을 주며, 동식물 및 인체에 축적됨으로써 심각한 건강 장애를 일으킬 수 있다(Brooks, 1983). 현재까지 알려진 동물과 인간의 건강에 해로운 영향을 미치는 잠재적 독성원소들은 Al, As, Ba, B, Cd, Co, Cr, Cu, Pb, Mg, Hg, Ni, Sb, Se, Tl, Th, Sn, U, V, Zn 등이 있으며(ATSDR, 1995), 이러한 잠재적 독성원소들은 주변 하천수 및 하상퇴적물을 심하게 오염시키며, 특히 하상퇴적물내의 잠재적 독성원소들은 하천수에 비하여 시간적

변화가 적고 함량도 높아서 지속적인 환경영향을 평가하는데 보다 적절한 지구화학적 매개체로 알려져 있다(Thornton, 1983). 또한 하상퇴적도는 이러한 원소들이 물속에 재 용출 될 수 있는 궁극적인 저장소(황춘길 외, 1999)로 잠재적인 오염원이 될 수 있다.

이번 연구에서는 유해성평가를 위해 1 : 50,000 남해 및 화개지형도폭내의 집수분지(drainage basin)를 대표하는 1차 수계(일부 2차 수계)에서 하상퇴적도를 채취하여, 주성분원소와 환경유해원소(Cu, Pb, Cr, Co)들의 함량과 분산 및 부화특성에 대해서 알아보고, 향후 연구지역의 지표환경에 오염이 발생되었을 경우 오염원의 파악 및 오염에 대한 대책 마련에 유용한 자료를 제시하고자 하였다.

2. 지형 및 수계

2.1. 남해지역의 지형과 수계

남해지역의 북위 34° 40'~36° 00', 동경 127° 45'~128° 00'으로 최고봉은 금오산(849 m)이며 남해도로 건너와서는 망운산(785.9 m), 송등산(617.2 m), 용봉산(472.7 m)등이 솟아 남해도의 남북방향성 지형을 지배하고 있다. 서상도쪽 동변에는 명산인 금산(665.6 m)이 솟아 있다. 평야의 발달은 빈약하고 산록에 소규모 페디먼트가 발달한다. 골짜기의 다수는 동서 내지 서북서-동남동 방향으로 발달하고 있는데 이는 단층 기어의 선상구조(Lineament)에 기인한다. 고봉을 중심한 방사상모양(Radial Pattern)의 수계가 발달한다. 퇴적암류 및 화산암류로 이루어진 본 지형은 지형이 비교적 험준하며 역암, 화강암 등의 애추가 금오산, 망운산, 삼봉산, 금오산, 송등산, 천황산, 괴음산을 중심으로 산사면에 넓게 발달하고 있다. 산동면 상주리 부근에는 화강암의 풍화물이 해변의 사장을 이루었다(상주해수욕장). 그 외에도 해안퇴적물은 육지 구성암석에 따라 남면 석고리에서는 자갈과 왕자갈로 구성된 퇴적물이 우세하고 화포리 일대에는 소규모 해변사가 퇴적되어 있다. 창선면 서측 해안에는 전형적인 선상지가 수처에 발달하고 있다(장기홍 외, 1989).

2.2. 화개지역의 지형과 수계

화개지역은 북위 35° 00'~35° 15', 동경 127° 30'~

127° 45'으로 소백산맥의 일부가 포함되며, 그의 하나인 지리산맥은 본 도폭과 운봉도폭의 경계를 따라 뻗어 있고, 본 산맥중의 최고봉인 지리산은 본 도폭의 동북단에서 직거리 약 1 km 동북쪽에 위치한다. 이 외에 지리산맥의 주능선에서 표고 1506 m인 노고단을 비롯하여 반야봉(1728 m) 및 1500 m 이상의 고봉들이 발달되어 있다. 동북방향으로 발달된 지리산맥에 거의 수직방향 즉, 동북방향으로 4개의 지맥이 뻗히고 이들은 본 도폭의 남단을 흐르는 섬진강에 이르러 소멸된다. 상기한 4개의 지맥의 고도는 700 m 내지 1,500 m에 달하며 1,115 m인 형제봉을 비롯하여 황장산(942 m), 왕시리봉(1,213 m), 형제봉(908 m)들이 이에 속한다.

수계는 전부가 지리산맥을 분수령으로 하여 상기 4개 지맥의 방향과 평행하게 남류하고 섬진강에 직각방향으로 유입한다. 화개천, 소곡천, 덕운내 등이 이에 속한다. 본 역의 주수계인 섬진강은 본 역 남동부에서 남서방향으로 흐르다가 하동도폭내로 유입된다. 섬진강의 수류는 완만하나 상기한 3개의 지류들은 비교적 급류를 이루고 있으며, 급한 하각작용을 보여 주기도 한다. 따라서 계곡은 V 지곡을 이루고 있으며, 산세는 대체로 둥근 모양을 형성하고 있다. 본 역에서 비교적 평탄한 평야지대는 덕운내가 섬진강과 합류하는 토지면 사무소 소재지 부근뿐으로 이 지역에서는 편상지 발달도 볼 수 있다.

각 계곡의 방향은 지질구조의 방향과 밀접한 관계를 갖는 것으로 사료된다. 특히 덕운내 계곡과 화엄사계곡은 배사축과 일치된다(손치무 외, 1964).

3. 시료채취 및 분석방법

3.1. 하상퇴적토

하상퇴적토는 중사 또는 표사, 암석, 토양, 빙하퇴적물, 호수퇴적물 등이 이용되며, 각 지질매체들은 그 형태와 존재특성에 따라 그들이 반영하는 범위와 대표성이 서로 다르게 된다. 집수분지(drainage basin)를 대표하는 소규모의 1-2차 수계의 하상퇴적토들은 상류 집수분지 내에 발달되어있는 암석과 토양으로부터 유래된 입자들이 모인 것이기 때문에, 연구지역의 지질(구성 암석)을 축약하여 집약시켜 놓은 것이나 다름없다는 점에서, 대표성이 뛰어난 것은 물론이고, 중금속과 미량원소를 잘 반영하고 있어(Darnley et al., 1990; Darnley et al., 1995; FOREGS, 1998) 연구지역의 지표지질을 가장 잘 반영하는 대표적인 지질매체로 받아들여지고 있다.

3.2. 수계선정 및 시료채취

시료채취 대상수계는 가능하면 낮은 등급(order)이어야 효과적이므로, 1:5만 축적의 지형도에 표시되어 있는 수계 가운데 “국제 지구화학 지도 작성 프로그램”에서 제안한 표준안(Darnley et al., 1995; UNESCO, 1990)을 준수하여, 발원지에 가까운 현재 물이 흐르고 있는 1차 수계(일부 2차 수계)를 대상으로 가능하면 균일한 채취밀도가 유지되는 것을 원칙으로 하였다. 채취대상 시료는 원칙적으로 물이 흐르고 있는 하천의 바닥에 가라앉아 있는 입자들이어야 하므로, 상류분지의 지표로부터 씻겨져 내려와 하천수에 의해 이동되어 하천바닥에 퇴적된 것을 선택하였다.

하상퇴적토를 채취 할 때에는 시료채취용 삽을 사용하였으며, 녹이 나는 일반철제나 구리 등으로 만들어진 삽은 시료에 오염을 가할 수 있으므로 stainless steel로 만들어진 시료채취용 삽을 사용하였다. 시료를 채취할 때에 가장 중요한 점은 채취된 시료가 상류의 집수분지를 잘 대표해야 한다는 점이다. 따라서 대상수계의 하천 바닥에서 그 하천의 상류지역을 대표하는 시료를 채취하기 위하여 하류에서 상류로 올라가면서 약 50 m 거리 내의 곳곳에 쌓여 있는 하상퇴적토를 5~10군데에서 여러 번에 걸쳐 조금씩 채취(grab sampling)하여 하나의 복합시료로 만들어 줌으로서, 채취된 하상퇴적토의 대표성을 증가시켰다. 또한 수계 양쪽의 지형이 가파른 경우에는 제방의 물질이 수계 쪽으로 붕괴되거나 미끄러져 내림으로서 상류 집수분지에서 유래되지 않은 하상퇴적토를 채취할 우려가 있으므로 수계의 중앙부에서 시료를 채취하였다. 이렇게 구체적으로 선정한 채취 가능한 모든 1차 수계(일부 2차 수계)를 대상으로 하여 채취한 하상퇴적토 시료는 남해지역 118개, 화개지역 47개 이었다(Fig. 1).

또한 시료채취에 있어서 시료채취지점의 상류 또는 부근에 폐광산, 주거지, 산업시설, 쓰레기 처리장, 축산 시설 등과 같이 인위적인 수계의 오염이 이루어졌거나 오염이 의심되는 지역에서는 이러한 시설의 영향이 없는 상류 쪽으로 이동하여 시료를 채취 하였다.

하상퇴적토의 입도는 연구목적에 따라 다양한 입도의 하상퇴적토를 이용할 수 있으며, 수계가 비교적 균일하게 잘 발달되고 지표에 암석노출과 토양발달이 양호한 우리나라의 경우에도 다양한 입자크기의 하상퇴적토 시료를 비교 연구한 결과, 150 μm 이하의 표사시료가 가장 적합하다고 판단되어(이현구 외, 1999) 150 μm 이하의 하상퇴적토를 채취하였다. 채취된 하상퇴적토는 100 mesh의 표준체를 이용하여, 현장에서 곧 바로 wet sieving을 실시하

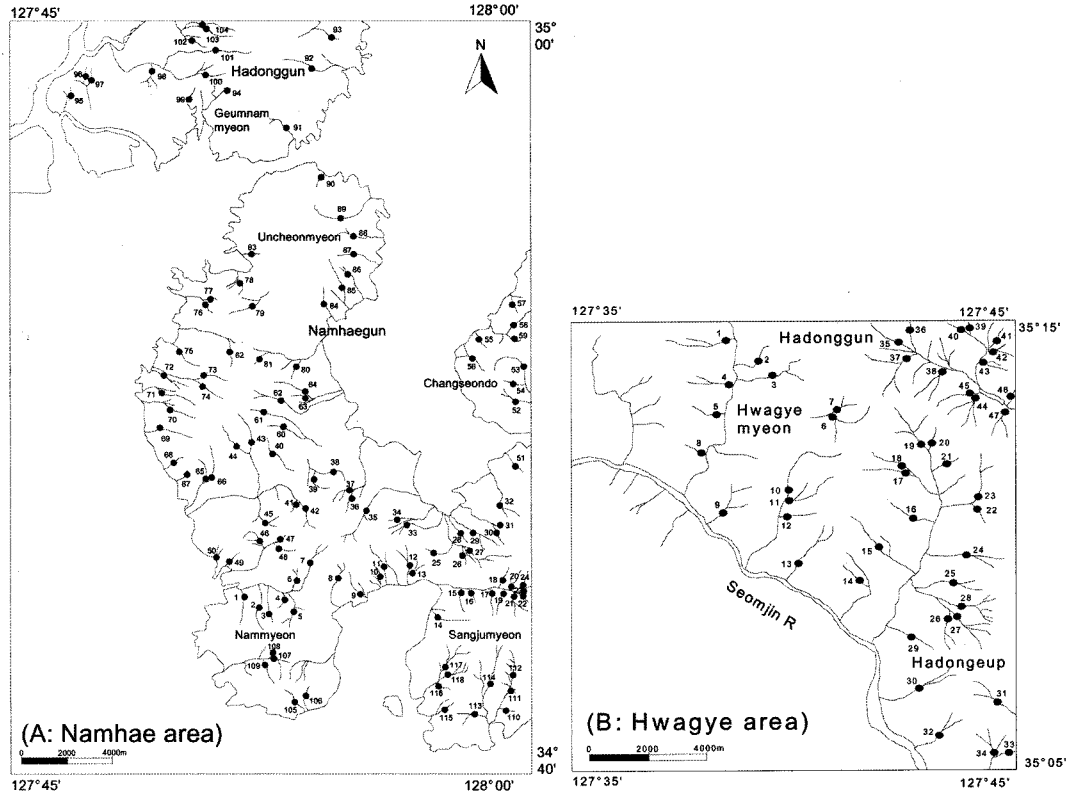


Fig. 1. Stream sediments sampling site map of the study area.

였다. 100 mesh 표준체를 통과한 150 μm 이하의 세립질 입자를 50~100 g 정도를 회수하여, 폴리에틸렌 병에 담아서 실험실로 운반하였다.

3.3. 분석방법

지각의 주성분원소인 규소(SiO₂)는 X선 형광 분광법(XRF)으로 분석하였다. 분광기(일본 Shimadzu Co., MXF-2100)는 다중 채널 형식이며, X선 발상장치의 튜브는 OEG-76H형이고, 표적은 로듐(Rhodium: Rh)이다. 시료를 잘 건조시킨 후, 정확하게 시료 1.0000 g에 5.5 g의 용제(lithium tetraborate: Li₂B₄O₇)를 혼합기에서 잘 섞어 백금 도가니에 담아 전기로에서 1100°C를 유지하며 15분간 용융시킨 다음, 냉각 고화시켜 압축기(Herzog type: HTP 40)로 34 mm의 원형 비드를 만든다. 이와 같이 시료를 용제와 함께 일정한 온도에서 용융시키면 공존하는 원소에 의한 흡수효과가 소멸 또는 감소되고 물리적으로 조건이 같게 되며, 시료의 불균일성 문제를 해결 할 수 있어 매트릭스 효과를 최소화 줄일 수 있는 장점이 있다(성학제 외, 1995).

환경유해원소 중 구리(Cu)와 납(Pb)은 유도결합 플라즈마 원자방출 분광법(ICP-AES)으로 분석하였고, Labtest

UV25(미국 Labtest Equipment Co.)분광기를 이용하였다. 표준용액은 SPEX 사의 ICP분석용 표준용액을 사용, 유사한 특성의 원소들끼리 4개의 그룹으로 나누어 0.1, 1.0, 10 μg/ml의 혼합용액을 사용하였다. 분석할 하상퇴적토 1 g을 1차로 HClO₄ 3 ml와 HF 5 ml를 혼합하여 200°C로 가열하여 분해시킨 후, 2차로 HClO₄ 2 ml, HF 3 ml 그리고 HCl 3 ml를 혼합한 후 200°C로 가열하여 분해시킨 다음 이를 1% HNO₃용액으로 만들어 측정하였다. 공인된 하천퇴적토 표준시료 JSD-1와 JSD-2(일본 Ibaraki 지역 하천퇴적토)를 측정하여 결과를 보정하였으며, 매번 측정할 때마다 브랭크 용액을 제조하여 측정하였다.

코발트(Co)와 크롬(Cr)은 중성자 방사화 분석(NAA)에 의해 분석하였다. 이때 중성자 발생을 위한 조사는 한국 원자력연구소에 있는 HANARO 원자로(Hi-flux Advanced Neutron Application Reactor)를 이용하였다. 중성자를 조사시킨 시료는 모든 성분이 중성자와 핵반응을 일으키게 되고, 이 때 생성된 방사성 핵종의 방사능은 방사성 핵종의 양에 비례하는데, NAA 분석에서는 여러 종의 방사선 가운데 감마선을 이용하였다. 하상퇴적토 시료의 감마선 검출에는 HPGe 감마선 검출시스템을 사용하였으며, 감마스펙트럼의 분석을 위해 EG & G 사의 Omimigam 소

프트웨어를 사용하였다. 분석시료가 다양하기 때문에, 표준시료는 미국 지질조사소(USGS)와 NIST의 6종을 사용하였는데, 표준시료들은 105°C에서 24시간 건조시켜 수분을 제거하고 100~200 mg 정도씩 정확히 측정하여 중성자 조사용 폴리프로필렌 용기에 넣고 밀봉하였다. 준비된 시료는 매뉴얼 PTS 장치에서 30분간 중성자를 조사하였다. 조사 후 약 30일간 그대로 두어 반감기가 비교적 짧고 분석방해를 줄 수 있는 핵종들이 소멸되고 나면, HPGe 반도체 검출기(효율 = 15%, FWHM = 2.0 KeV at 1.33 MeV)로 3,000초씩 측정하였다.

이렇게 분석된 결과 값들은 SPSS 11.0 for windows 통계패키지 소프트웨어를 사용하여 통계처리 하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 환경유해원소 분산특성

남해지역 하상퇴적토에 대한 유해원소의 함량은, Cu 5.66~168 ppm, Pb 18.0~40.7 ppm, Cr 21.6~147 ppm, Co 4.86~25.3 ppm 범위를 보였고, 화개지역에서는 Cu 16.4~41.2 ppm, Pb 26.5~37.5 ppm, Cr 79.6~153 ppm, Co 15.7~29.5 ppm 범위를 보였다(Table 1).

구리(Cu)는 대표적인 친동원소인 중금속으로 염기성 마그마의 초기 결정단계에서 마그마로부터 유리되어 나오므로 규산염 광물에도 들어갈 수 없는 특징을 가진다(Wager and Mitchell, 1951). 또한 지각(Earth crust)에서 50 ppm, 토양에서 2~100 ppm, 화강암에서는 10 ppm, 셰일에서는 50 ppm 정도 함유되어 있다(Rose et al., 1979; Taylor, 1964; Taylor and McLennan, 1995; Turekian and Wedephol, 1961). 남해지역내 구리(Cu)는 정규분포를 이루고 있으며(Fig. 2), 시료번호 N-82(남해군 고현면 대계마을 부근)에서 구리(Cu)의 함량은 168 ppm으로 토양 오염대책기준(제 20조 관련, 가지역) 125 ppm, 토양 및 퇴적물의 환경오염 허용 한계치(Kabata-Pendias and

Pendias, 1984)인 100 ppm보다 높아, 과다농집 지역임을 보였다. 이는 모암의 풍화 운반 및 퇴적 과정에서 특히 원소의 이동과 잔류에 의해 과잉 농집된 것으로 사료되므로 특별한 관리가 필요하다. 그러나 기하평균에서는 23.4 ppm으로 토양오염우려기준(가지역) 및 지각 평균인 50 ppm보다 낮은 함량특성을 보였다. 화개지역내 구리(Cu)도 정규분포를 이루고 있으며, 기하평균에서도 27.4 ppm으로 과다농집 지역이 관찰되지 않았다(Table 1).

납(Pb)은 중금속으로 친동원소이다. 지각에서 10 ppm(Rose et al., 1979)이며, 토양 및 퇴적물의 환경오염 허용 한계치(Kabata-Pendias and Pendias, 1984)는 100 ppm 이지만, 분포는 상대적으로 집중되어 광상에 많이 모여 있다. 남해지역 및 화개지역 모두에서 정규분포를 이루고 있으며(Fig. 2), 기하평균에서도 남해지역에서는 26.9 ppm, 화개지역에서는 32.3 ppm으로 토양오염우려기준(가지역) 100 ppm보다 낮은 함량특성을 보였다.

크롬(Cr)은 지각에서 100 ppm(Rose et al., 1979)이며, 화강암에서는 4 ppm (Levinson, 1974)으로, 초염기성암에 많이 분포한다. 토양 및 퇴적물의 환경오염 허용 한계치(Kabata-Pendias and Pendias, 1984)는 100 ppm으로 지각 중의 크롬(Cr) 함량과 일치한다. 남해지역 크롬(Cr)함량은 정규분포를 이루고 있으며(Fig. 3), 시료번호 N-61(남해군 남해읍 이산리 부근)에서 147 ppm으로 높은 함량을 보였다. 화개지역 크롬(Cr)함량은 부적분포를 이루고 있으며(Fig. 3), 시료번호 H-37, 43(하동군 청암면 목계리 부근)에서 153 ppm으로 토양 및 퇴적물의 환경오염 허용 한계치 100 ppm 보다 높은 함량특성을 보였다. 기하평균에서도 남해지역은 59.7 ppm으로 지각평균보다 낮았지만, 화개지역에서는 121 ppm으로 화개지역 전반에서 지각평균보다 더 높게 관찰되었다(Table 1). 그러나 남해 및 화개지역 하상퇴적토의 지질집단은 대부분 퇴적암류 및 편마암류가 차지하고 있으며, 특별히 크롬 함량이 높을 수 있는 오염원이 발견되지 않아서, 지하심부에 광화대가 존

Table 1. Contents (ppm) of hazardous elements with stream sediments in study area

	Namhae area				Hwagye area			
	Cu	Pb	Cr	Co	Cu	Pb	Cr	Co
Min	5.66	18.0	21.6	4.86	16.4	26.5	79.6	15.7
Max	168	40.7	147	25.3	41.2	37.5	153	29.5
Mean	27.2	27.3	63.8	14.8	27.8	32.4	123	22.3
S.D	17.6	4.64	23.5	5.04	4.72	2.25	19.2	3.85
G.M	23.4	26.9	59.7	13.9	27.4	32.3	121	21.9
Median	24.2	27.1	61.5	14.5	27.7	32.0	123	22.4

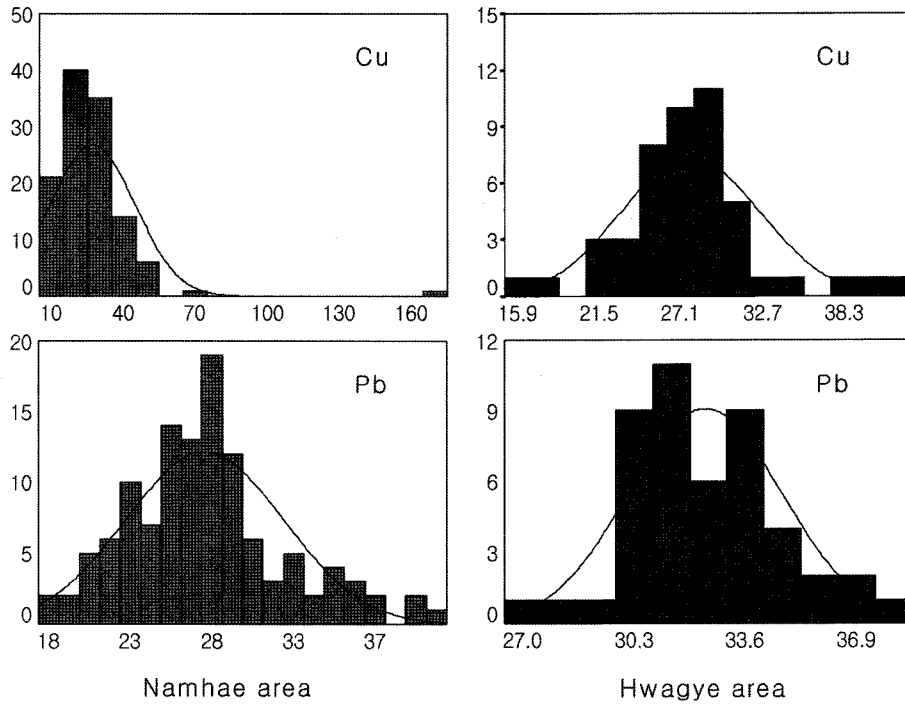


Fig. 2. Histograms of Cu and Pb in the study area (unit in ppm).

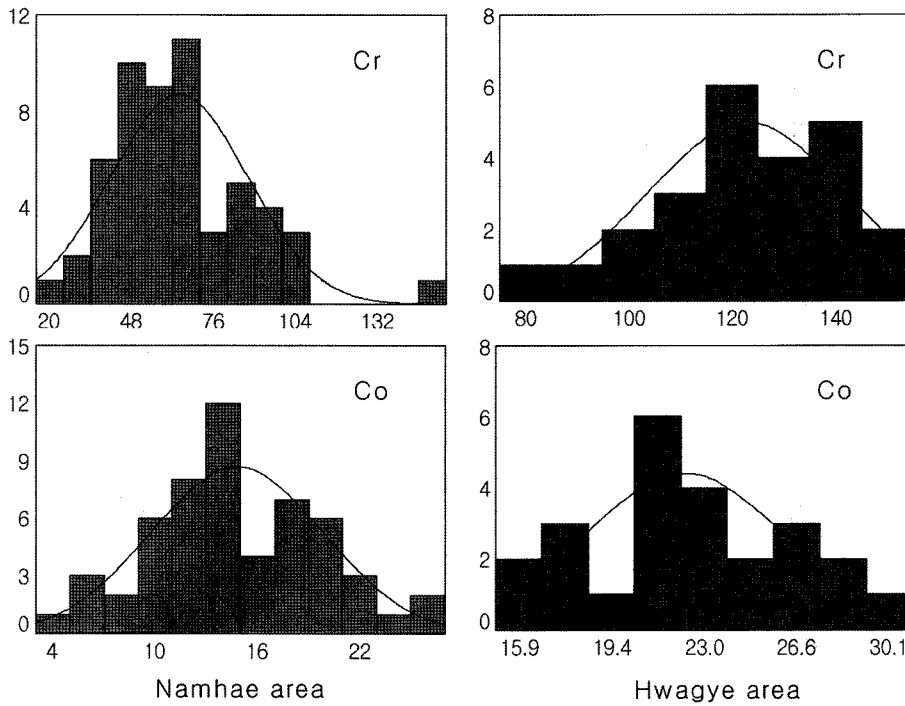


Fig. 3. Histograms of Cr and Co in the study area (unit in ppm).

재하는 것으로 판단된다. 그래서 추후에는 세포막에 대한 침투력과 산화능력을 가지고 있으며 독성을 가지는 Cr⁶⁺의 부존에 대한 추가적인 조사가 필요하다고 사료된다.

코발트(Co)는 중금속이며 희유원소이다. 지각에서 25 ppm, 세일에서 20 ppm, 현무암에서 50 ppm, 화강암에서 1 ppm으로 염기성암에서 풍부하며(Rose et al., 1979;

Taylor, 1964; Taylor and McLennan, 1995; Turekian and Wedephol, 1961), 토양 및 퇴적물의 환경오염 허용 한계치는 50 ppm이다. 두 지역의 코발트(Co) 함량은 정규 분포를 이루고 있으며(Fig. 3), 남해지역 4.86~25.3 ppm 화개지역 15.7~29.5 ppm으로 과다농집 지역은 관찰되지 않았다(Table 1). 그러나 남해지역의 시료번호 N-113(상주면 상주리 부근)은 4.86 ppm으로 결핍지역임을 보여준다.

4.2. 환경유해원소들의 분산패턴

중금속 원소들의 분산특성 결과는 각각 원소들의 부화 특성결과를 나타낼 수 있지만, 여러 원소에 의한 종합적인 부화양상을 규명하기는 힘들다. 환경유해원소에 의한 토양 내 부화정도를 평가하기 위해서는 각 원소에 대한 분산특성 외에 이들 원소들로부터 부화정도 평가에 의미 있는 합수를 도출해 내는 것이 필요하다(Porter et al., 1995).

E.I.(Enrichment Index)는 토양에 포함되어 있는 환경유해원소 함량을 토양내의 건강에 악영향을 미친다고 판단되는 기준값(tolerable level)인 Cu : 100 ppm, Pb : 100 ppm, Cr : 100 ppm, Co : 50 ppm으로 나누어 준 후 합한 값을 지수산출에 투여된 원소의 수로 나누어 준 값이다.

이 때 기준값으로 Kabata-Pendias and Pendias(1984)가 제시한 토양 및 퇴적물의 환경오염 허용 한계치를 이용하였다.

$$E.I. = \frac{Cu/100 + Pb/100 + Cr/100 + Co/50}{4}$$

E.I가 1 이상은 부화 우려지역, 1 이하는 비부화 지역으로 구분할 수 있는데, 남해지역의 55개의 시료에서 E.I.는 0.15~0.67, 기하평균 0.35이고 화개지역의 24개 시료에서 E.I.는 0.44~0.68, 기하평균 0.56으로 두 지역 모두에서 1 미만인 비부화 지역임을 알 수 있었다(Table 2).

환경유해원소의 종합적인 부화양상을 규명하기 위한 세

계적인 평균조성을 기준으로 비교하는 것뿐만 아니라, 가능한 한 특정지역의 모암 또는 기반암을 기준으로 부화정도를 고찰 하는 것도 또한 중요하다고 판단되었다. 이는 하상퇴적토가 1차 수계(일부 2차 수계)에 분포하는 기반암(모암)의 물리-화학적 풍화작용에 의해 생성되어 유수에 의해 운반, 퇴적되어 특정지역의 지표지질을 가장 잘 축약하며, 중금속과 미량성분을 잘 반영하는 하는 대표적인 지질매체로 받아들여지고 있기 때문이다.

그리하여 유기물 함량에 의한 영향을 제거한 보존성 원소를 이용한 E.F.(Enrichment Factor)를 산출하였다(Bruland et al., 1974). E.F.는 연구지역 시료의 환경유해원소 X와 보존성 원소의 비를 지각 평균함량비로 나누어 주는 것이며, 보존성원소는 분산정도가 가장 작은 원소인 알루미늄과 철이 주로 이용되는데, 이번 연구에서는 상대적인 함량변화가 작은 알루미늄을 이용하였으며, 지각 평균값은 'Average of contents in granite and mafic rocks'(Rose et al., 1979)에 의해 발표된 값을 사용하였다.

$$E.F. = \frac{(X/A)_{\text{sediment}}}{(X/A)_{\text{Earth crust}}}$$

E.F가 1 이상은 유해원소 함량이 지각 평균보다 초과하는 것으로 농축된 지역을 의미한다.

남해지역에서 구리(Cu)는 0.12~2.73으로, 지각평균보다 초과 농축된 지역이 최고 2.73을 포함 세 지역이(NH-82, 78, 13; 남해군 서면 중현리, 고현면 차면리, 이동면 화계리 부근) 관찰되었다. 납(Pb)은 2.01~4.69으로 모든 시료에서 지각평균 보다 초과 농축된 것으로 관찰되었는데, 이는 Rose et al.(1979)에 발표된 납의 지각평균값이 10 ppm인데, 연구지역 모든 지역에서 10 ppm을 초과하였기 때문이다. 크롬(Cr)은 0.22~1.38으로 지각평균보다 초과 농축된 지역이 최고 1.38을 포함 네 지역이(NH-61, 82, 93, 99; 남해읍 아산리 부근, 남해군 서면 중현리, 하동군

Table 2. Enrichment Factors (E.F.) and Enrichment Index (E.I.) of each hazardous elements with stream sediments in study area

	Namhae area					Hwagye area				
	E.F.				E.I.	E.F.				E.I.
	Cu	Pb	Cr	Co		Cu	Pb	Cr	Co	
Min	0.12	2.01	0.22	0.20	0.15	0.28	2.40	0.63	0.57	0.44
Max	2.73	4.69	1.38	0.95	0.67	0.68	3.18	1.36	1.04	0.68
Mean	0.51	2.61	0.62	0.56	0.36	0.49	2.85	1.08	0.78	0.57
S.D	0.29	0.48	0.24	0.16	0.09	0.08	0.16	0.20	0.13	0.07
G.M	0.46	2.57	0.58	0.54	0.35	0.48	2.84	1.06	0.77	0.56
Median	0.46	2.49	0.56	0.54	0.36	0.48	2.86	1.10	0.77	0.56

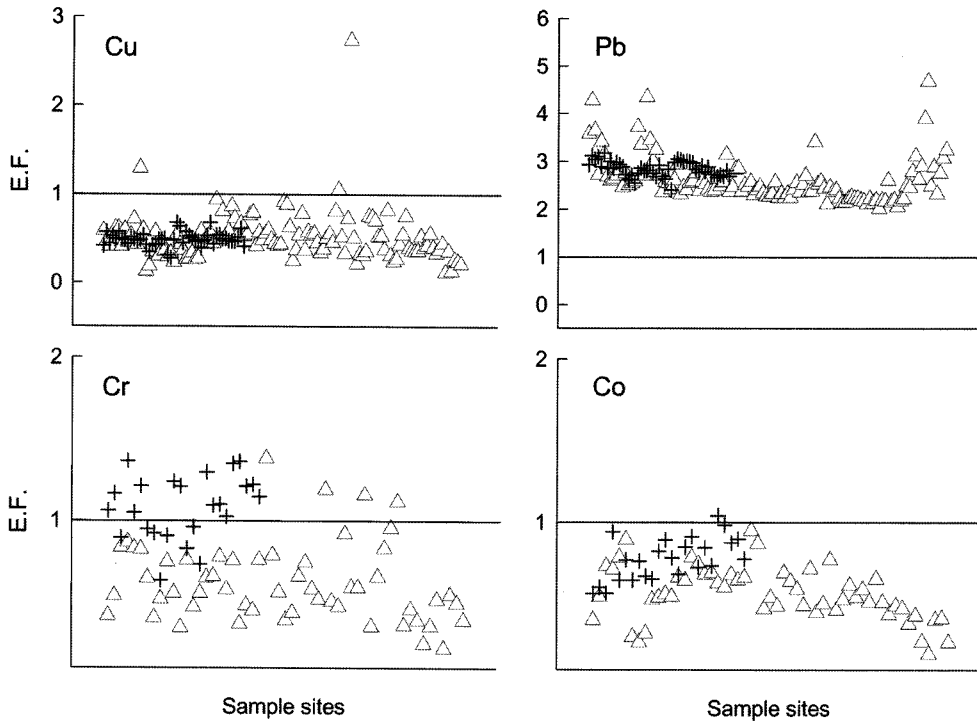


Fig. 4. Enrichment Factor (E.F.) of each analysed hazardous elements (open triangle : Namhae area, cross hair : Hwagye area).

금남면 대치리, 금남면 대송리 부근) 관찰되었으며, 코발트(Co)는 0.20~0.95으로 초과 농축된 지역은 발견되지 않았다(Table 2, Fig. 4).

화개지역에서 구리(Cu)는 0.28~0.68으로 초과 농축된 지역은 발견되지 않았으며, 납(Pb)은 2.4~3.18으로 남해지역과 같이 초과농축 되었음을 보였다. 크롬(Cr)은 0.63~1.36으로 하상퇴적토의 크롬(Cr)함량이 지각평균인 100 ppm을 초과하여 지각평균 보다 농축되어 있는 지역이 최고 1.36을 포함 열 여섯 지역이(HD-6 외; 화동군 화계면 호강골 부근 외) 관찰되었으며, 코발트(Co)는 0.57~1.04으로 초과 농축된 지역이 최고 1.04인 한 지역(화동군 청암면 목계리 부근)이 관찰되었다(Fig. 4). 두 연구 지역 E.F.의 기하평균에서는 구리(Cu), 납(Pb), 코발트(Co)는 거의 비슷한 부화특성을 보였으나, 크롬(Cr)에서는 남해지역보다 화개지역에서 보다 큰 부화(enrichment) 특성을 보였다(Table 2).

4.3. 주성분 및 환경유해원소의 거동 특성

남해 및 화개지역 하상퇴적토의 환경유해원소들을 주성분 원소인 규소(SiO₂)의 함량에 따른 변화를 살펴보았다. 다른 원소들보다 이동성이 큰 구리(Cu)는 SiO₂의 함량이 증가할수록 구리(Cu)의 함량도 증가하는 정(+)의 거동을 보이는 것이 일반적인 특징이지만(이현구 외, 1999), 남해

및 화개지역 모두에서 그 반대인 각각 -0.533**, -0.381**으로 규소(SiO₂)의 함량이 증가할수록 구리(Cu)의 함량이 감소하는 부(-)의 거동을 보였다(Table 3). 코발트(Co)는 염기성암석에 풍부한 원소들로 규소(SiO₂)가 증가함에 따라 낮은 함량을 갖는 것으로 알려져 있는데(Taylor and McLennan, 1985), 두 지역 모두에서 각각 -0.660**, -0.617**으로 규소(SiO₂)가 증가함에 따른 코발트(Co)의 함량이 감소하는 부(-)의 거동이 관찰되었다(Fig. 5).

환경유해원소들간의 거동에서 남해지역의 하상퇴적토는 코발트(Co)에 대한 구리(Cu)와 크롬(Cr)의 함량변화에 각각 0.709**, 0.641* 정(+)의 높은 상관성을 보여주며, 화개지역의 하상퇴적토는 코발트(Co)에 대한 크롬(Cr)의 함량변화에 0.509*의 정(+)의 상관성을 보였다(Table 3).

5. 결 론

남해 및 화개지역내의 1차 수계에 존재하는 하상퇴적토를 대상으로 화학분석을 수행하고 통계분석, E.I., E.F.를 도출한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 남해지역은 Cu 5.66~168 ppm, Pb 18.0~40.7 ppm, Cr 21.6~147 ppm, Co 4.86~25.3 ppm인 분산특성을 보였다. 남해군 고현면 대계마을 부근에서는 구리(Cu)의 분산 특성이 토양오염대채기준보다 높는데, 이는 모암의 풍화

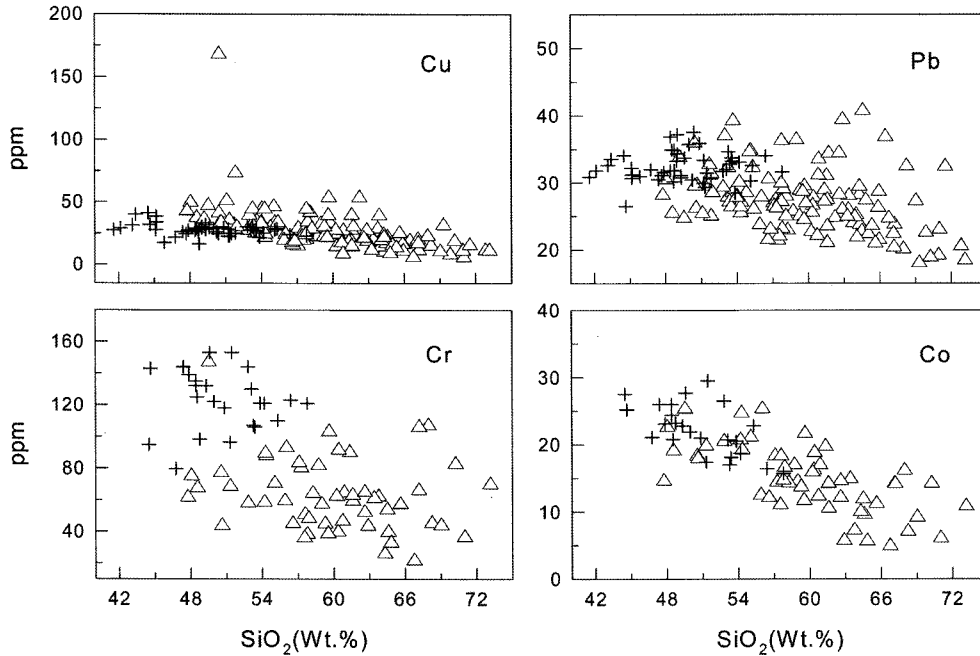


Fig. 5. Correlation between SiO₂ against hazardous element in the study area (open triangle : Namhae area, cross hair : Hwagye area).

Table 3. Correlation coefficients of major and hazardous element with stream sediments in study area

	Namhae area					Hwagye area				
	SiO ₂	Cu	Pb	Cr	Co	SiO ₂	Cu	Pb	Cr	Co
SiO ₂	1.000	-0.533**	-0.362**	-0.239	-0.660**	1.000	-0.381**	0.092	-0.029	-0.617**
Cu		1.000	0.218*	0.397**	0.709**		1.000	0.196	0.174	0.396
Pb			1.000	-0.230	-0.048			1.000	-0.124	-0.054
Cr				1.000	0.641*				1.000	-0.509*
Co					1.000					1.000

** Correlation is significant at the 0.01 level.

* Correlation is significant at the 0.05 level.

운반 및 퇴적의 과정에서 특히 원소의 이동과 잔류에 의해 과잉 농집된 것이며, 남해군 남해읍 아산리 부근에서는 크롬(Cr)이 토양 및 퇴적물의 환경오염 허용 한계치보다 높은 것은 지하심부에 광화대가 존재하는 것으로 사료되므로 특별한 관리가 필요하다고 판단된다. E.I.에서는 모든 지역이 1 미만인 비부화 지역으로 관찰되었으나, E.F.에서는 남해군 서면 중현리 부근에서는 구리(Cu)가 남해읍 아산리 부근에서는 크롬(Cr)이 부화된 것으로 사료된다.

2. 화개지역은 Cu 16.4~41.2 ppm, Pb 26.5~37.5 ppm, Cr 79.6~153 ppm, Co 15.7~29.5 ppm인 분산특성을 보였다. 크롬(Cr)의 분산특성에서 하동군 청암면 목계리 부근을 포함 대상시료 대부분에서 토양 및 퇴적물의 환경오염 허용 한계치보다 높은 분산특성을 보였다. 특히 E.F.에서

는 화동군 화계면 호강골 부근을 최고로 열 여섯 지역이 부화계수의 이상치가 관찰되었다. 그러나 특별한 크롬(Cr)의 오염원이 발견되지 않는 점으로 보아, 지하심부에 광화대가 존재하는 것으로 판단되며, 토양오염기준 원소인 Cr⁶⁺에 대한 추가적인 재조사가 필요할 것이다. E.I.에서는 모든 지역이 1 미만인 비부화 지역으로 관찰되었으며, E.F.에서는 코발트(Co)가 하동군 청암면 목계리 부근에서 부화된 것으로 사료된다.

3. 상관분석에서는 연구지역 모두에서 규소(SiO₂)의 함량이 증가할수록 구리(Cu)는 상관계수가 각각 -0.533**, -0.381**, 코발트(Co)는 상관계수가 각각 -0.660**, -0.617**으로 함량이 감소하는 부(-)의 거동을 보였으며, 각 지역별 환경유해원소들간의 거동에서 남해지역은 코발트(Co)와 구리(Cu)의 상관계수 0.709**으로 높은 정(+) 상관관계

를 보였으며, 화개지역에서는 코발트(Co)와 크롬(Cr)의 상관계수 0.509*의 높은 정(+)의 상관성을 보였다.

4. 납(Pb)은 두 지역 모두에서 토양환경보전법 시행규칙 토양오염우려기준(가지역), 토양오염대책기준(가지역) 및 토양 및 퇴적물의 환경오염 허용 한계치(tolerable level) 보다 낮은 분산특성을 보이며, E.F에서는 남해지역 2.57, 화개지역 2.84로 지역 전체에서 부화된 것으로 판단된다. 그러므로 남해-화개 지역에 대한 지속적인 관리가 이루어져야 할 것이다.

사 사

논문의 미비한 부분에 대해 구체적이고 세심하게 수정 보완 하도록 해주신 두 분 심사위원님께 깊이 감사드립니다. 이 연구는 고가특수연구기지지원사업(고분해능 X-선 회절분석기와 다기능 X-선 회절분석기) 지원을 받아 연구 되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 박영석, 김종균, 한민수, 김용준, 장우석, 신성천, 2002, 장흥지역 1차 수계 하상퇴적물의 지 질집단별 지구화학적 특성과 하천수에 대한 연구, *자원환경지질*, **35**, 509-521.
- 박영석, 장우석, 김종균, 2003, 구례지역 하상퇴적물의 지질집단별 자연배경치에 대한 연구, *자원환경지질*, **36**, 275-284.
- 성학제, 음철현, 우형주, 김영석, 양문열, 손용오, 송덕영, 정경호, 송석희, 박진태, 전치완, 최 병인, 김상연, 이정화, 윤우열, 심상권, 정강섭, 김태삼, 김진한, 양명권, 조고교, 길대섭, 김 학진, 이길용, 김준곤, 윤윤열, 천상기, 주승환, 김낙배, 김덕경, 최한우, 조수영, 1995, 지질 시료 분석체계 및 정도관리시스템 개발(I), 한국자원연구소, KR-95(T)-10, 419.
- 손치무, 이상만, 원종관, 장기홍, 김영주, 1964, 한국지질도 화개도폭, 경상남도.
- 염승준, 이평구, 강민주, 신성천, 유연희, 2004, 주암댐 집수유역 내 하상퇴적물의 중금속 오염현황 및 거동특성, *자원환경지질*, **37**, 311-324.
- 이승구, 양동운, 홍세선, 광재호, 오근창, 2003, 회토류원소를 이용한 순창지역 섬진강 수계내 하상퇴적물의 기원지 연구, *지질학회지*, **39**, 81-97.
- 이현구, 조애란, 이찬희, 1999, 입도분포에 따른 하상퇴적물의 지구화학적 분산 및 부화, *자원환경지질학회지*, **32**, 247-260.
- 장기홍, 이영길, 김규환, 1989, 한국지질도 남해서상도폭 지질보고서, 한국동력자원연구소.
- 전효택, 1995, 토양에서의 잠재적 독성 금속원소들의 분산과 오염평가, 대한지질학회 대한자원환경지질학회 공동학술강연회 발표논문집, 8-31.
- 황춘길, 김경웅, 이현구, 1999, 지구통계학적인 방법에 의한 충남 단천 하상퇴적물의 미량 원소 오염조사, *자원환경지질학회지*, **32**, 63-72.
- ATSDR(Agency for Toxic Substances and Disease Registry), 1988~1995, Public Health Statement; <http://atsdr1.atsdr.cdc.gov:8080/ToxProfiles/>, [ToxFAQs](http://atsdr1.atsdr.cdc.gov:8080/ToxFAQs/); <http://atsdr1.atsdr.cdc.gov:8080/ToxFAQs/>.
- Brooks, R.R., 1983, Biological methods of prospecting for minerals, John Wiley and Sons Inc., p. 321.
- Bruladn, K.W., Bertine, K., Koiole, M., and Goldberg, E.D., 1974, History of metal pollution in Southern California coastal zone, *Environ. Sci. Tech*, **8**, 425-432.
- Darnley, A.G., Bjorklund, A., Bolviken, B., Gustavsson, N., Koval, P.V., Plant, K.A., Steinfeld, A., Tauchid, M., Xie Xuejing, Garrett, R.G., and Hall, G.E.M., 1995, A Global Geochemical Database for Environmental and Resource Management-Recommendations for International Geochemical Mapping, *Final Report of IGCP Project 259, Earth*.
- Davis, B.D. and Ballinger, R.C., 1990, Heavy metal soils in north Somerest, England, with special reference to contamination from base metal mining in the Mendips, *Environ Geochem Health*, **12**, 291-300.
- FOREGS(Forum of European Geological Surveys), FOREGS Geochemical mapping field manual, Geological Survey of Finland Guide **47**, p. 1-36.
- GNHPR(Group for Natural Hazard Prevention Research), 2001, Korea Institute of Geoscience and Mineral Research.
- Kabata-Pendias, A. and Pendias, H., 1984, Trace elements in soil and plants, CRC Press INC, p. 315.
- Levinson, A.A., 1974, Introduction to Exploration Geochemistry, Applied Publishing Ltd., Maywood, p. 614.
- Porter, E.L., Kent, R.A., Andersen, D.E., Keenleyside, K.A., Milne, D., Cureton, P., Smith, S.L., Drouillard, K.G., and MacDonald, D.D., 1995, Development of proposed Canadian environment quality guidelines for cadmium, *J. Geochem. Expl.*, **52**, 205-219.
- Rose, A.W., Hawkes, H.E., and Webb, J.S., 1979, Geochemistry in mineral exploration, 2nd ed., Academic Press, p. 657.
- Taylor, S.R., 1964, Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **28**, 1273-1285.
- Taylor, S.R. and McLennan, S.M., 1985, The Continental Crust: Its Composition and Evolution, *Blackwell Scientific Publ*, Oxford, England, p. 312.
- Taylor, S.R. and McLennan, S.M., 1995, The geochemical evo-

lution of the continental crust. *Rev. Geophys*, **33**, 241-265.

Thornton, I., 1983, *Applied Environmental Geochemistry*, Academic Press, p. 501.

Turekian, K.K. and Wedephol, K.H., 1961, Distribution of the elements in some major units of the Earth's crust. *Geol. Soc.*

America Bull, **72**, 175-192.

UNESCO, 1990, *Geological Map of the World*.(Scale 1:25,000,000; edited by O.Dottin.) Commission for the geological Map of the World, United Nations Educational, *Scientific and Cultural Organization*, Paris.