

지구화학적 재해 평가를 위한 지화학도 작성 및 기준치 설정

신성천, 염승준(한국자원연구소), 황상기(배재대학교)

Geochemical baseline mapping for geochemical hazard assessment

Seong-Cheon Shin, Seung-Jun Youm(Korea Institute of Geology, Mining and Materials),
Sang-Gi Hwang(Paichai University)

요약 : 전국의 자연환경에서의 지구화학적 재해를 정량적으로 평가할 수 있는 체계를 구축하기 위하여, 지난 4년간 경기-수도권, 충남, 충북, 전남, 전북 등 국토 서반부 전역(45,000 km²)에 분포하는 1-2차 수계(총 11,000 개)의 하천퇴적물(150 μm 이하의 표사)을 대상으로 주원소 성분 10종과 미량원소 26종에 대해 지화학도를 작성하였다. 각 지질(구성암석)별 자연 배경치, 권역별 방대한 시료의 분석자료의 통계처리에 근거한 평균치 등 다양한 기준치를 설정하고, 유해원소의 과다농집과 필수성분의 결핍현상 등 지구화학적 재해의 유형별 평가에 필요한 등급을 설정·제시하였다. 실제로 몇 가지 지구화학적 재해사례를 권역별로 선별하여 다양한 전산 지화학도와 평가기준치에 근거하여 고찰하였다.

주요어: 지구화학적 재해, 지화학도, 자연 배경치, 기준치, 하천퇴적물

Abstract : The national geochemical baseline mapping project has been conducted since 1996 to establish a quantitative assessment system for geochemical hazards in natural environments. The geochemical image maps have been edited for thirty-six elements(i.e., 10 major oxides and 26 trace elements) in light sediments, finer fraction than 150 μm, collected from first- to second-order streams(totally 11,000) over five provinces in the western half(ca. 45,000 km²) of Korea. Natural background values of the elements were given for different geological environments. Based on the statistics, geochemical baselines were newly obtained for a quantitative hazard assessment on toxicity of heavy metals and deficiency of essential nutrients. Some chosen examples of geochemical hazards are presented based on new geochemical image maps and related baseline data.

Key words: geochemical hazard, geochemical map, natural background, baseline, stream sediment

1. 서론

선진국은 과거 장기간에 걸친 자원개발과 산업발달로 인한 자연환경을 파괴해 오던 활동 위주에서, 지금은 자연환경을 보전하고 관리하는 쪽으로 정책을 전환하였다. 유엔교육과학문화기구(UNESCO)와 국제지질과학연합(IUGS)은 1988년부터 2005년까지 유럽 전역의 지화학도 작성과 지구화학적 평가기준치를 설정함으로써, 지표환경에서 일어나고 있는 지구화학적 재해(geochemical hazards)를 정량·정성적으로 관측·평가하고 방지하는 데에 국가차원의 노력을 기울이고 있다.

지구화학적 재해란 일반적으로 산사태나 화산활동 등과 같이 급작스럽게 가시적으로 일어나는 동력학적 지질재해와는 달리, 유독한 원소의 자연적인 과다농집이나 필수원소의 지나친 결핍 등으로 인하여 사람이나 동식물에게 심각한 악영향을 미치는 경우를 통칭한다.

비소, 카드뮴, 납, 코발트, 크롬, 니켈, 아연 등과 같은 중금속이 지질학적인 과정을 거쳐 비정상적으로 과다농집된 부분이 자연적으로 또는 광산개발을 통해 지표에 노출되어 여러 경로를 통해 이동·확산되게 되면, 그 함량정도와 존재형태에 따라 사람과 동식물에 심각한 지구화학적 재해로 작용한다. 이와는 반대로, 칼슘, 마그네슘, 칼륨, 인, 나트륨 등은 산림과 농산물의 성장과 인체에 필수적인 영양원소로서, 지나치게 부족한 경우에는 지표환경을 황폐화시키는 지구화학적 재해의 요인이 된다.

일반적으로 지구화학적 재해는 눈으로 쉽게 인지되지 않으므로, 이에 대한 대응이 소홀하기 쉽다. 광산지역 등에서 지질학적인 과정을 거쳐 과다농집된 중금속은 개발과정에서 주변으로 확산되는 현상이 가시적으로 인지되므로 최근 많은 연구가 시도되고 있다. 그러나, 유해성 평가에 필요한 체계적인 국내 평가기준이 설정되어 있지 않아 외국 기준을 적용하는 예가 많다. 특히, 필수영양원소의 결핍현상은 식별이 잘 되지 않으므로, 대응하기가 더욱 어려운 실정이다. 여기에서, 최근 산업발달과 인구증가로 인해 급증하는 이차적인 인위오염까지 겹쳐 자연환경의 황폐화 양상은 더욱 복잡해지고 있다.

따라서, 과학기술부의 중점국가연구개발사업으로 지정된 '자연재해방재기술개발사업단'에서는 우리나라의 자연환경에 존재하는 원소별 함량과 그 분포상태를 지구화학적 재해 차원에서 평가하고, 이차오염의 평가 시에도 정량·정성적인 기본 척도로 적용할 수 있는 원소별 지화학도의 작성과 평가 기준치 설정사업을 수행 중이다. 주요 연구내용은 i)지표 자연환경을 대표하는 시료의 채취, 현장측정 및 야외정보 수집, ii)주원소·미량원소의 분석 및 분석자료 품질관리, iii)각 성분별 존재량과 분포상태를 나타내는 전산지도 작성, iv)지질단위와 구성암석에 따른 원소별 배경치와 평가 기준치 설정, v)지구화학적 재해의 유형별 등급평가와 원인분석, vi)지도책, CD-R, DB 등 연구결과의 제작·보급 및 상설 web 운영을 통한 지구화학적 재해 관련 정보의 실용화에 이르기까지 일련의 지구화학적 재해의 평가체계 구축이 포함된다. 1996년 11월부터 4년 동안 경기도-수도권, 충남, 충북, 전남, 전북 등 국토 서반부 전역(전국면적의 45%)에 대한 1단계 사업이 완료됨으로써 이 분야에 있어서 급속한 발전을 가져오게 되었다. 현재 우리나라의 하천퇴적물에 의한 지화학도 완성면적은 45,000 km²로써 UNESCO 보고서(Darnley, A.G. *et al.*, 1995)에 의하면 중국, 미국, 브라질, 캐나다, 러시아 등 국토대국과 유럽 선진국에 이어 세계 31위, 아시아에서는 중국(950만 km²), 이란(35만 km²), 인도네시아(19만 km²), 일본(79,000 km²)에 이어 5위이다. 우리나라의 완성율(45%)은 아시아에서는 중국(95%) 다음 2위, 세계 13위 대열로 앞당겨 졌다.

2. 야외탐사와 정보수집

2-1. 대표시료

일반적으로 지화학도 작성을 위한 시료는 목적에 따라 하천퇴적물의 중사(重砂) 또는 표사(漂砂), 암석, 토양, 빙하퇴적물(till), 호수퇴적물, 식물 등 다양한 지질매체가 이용된다. 각 매체는 그 형태와 존재 특성에 따라, 그들이 반영하는 범위와 대표성이 서로 다르기 때문이다. 지구화학적 재해 평가의 기준도인 원소별 지화학도를 작성하는 데에 이용되는 시료는 무엇보다도 지표지질환경을 가장 잘 대표해야 한다는 점이 우선 전제조건이다. 수계가

비교적 균일하게 잘 발달되고 지표에 암석노출과 토양발달이 양호한 우리나라의 경우에는 작은 집수분지(drainage basin)를 대표하는 소규모의 1-2차 수계의 하천바닥에 쌓인 표사가운데 150 μm 이하의 미세한 실트-점토 크기의 무기질 입자를 대표시료로 하는 것이 효율적인 것으로 인정받고 있다(UNESCO 보고서, Darnley *et al.*, 1995). 그 이유는 이러한 표사시료는 집수분지 내에 발달되어 있는 암석과 토양으로부터 유래된 입자들이 모인 것으로서, 상류의 지질(구성암석)을 축약시켜 집결시켜 놓은 것이나 다름없다는 점에서, 대표성이 가장 뛰어나고, 중금속과 미량원소를 잘 반영하기 때문이다. 시료의 입자크기는 나라별로 자연조건과 목적에 따라 다양하지만, 이러한 다목적 지화학도 작성에는 150 μm 보다 미세한 입자가 가장 적합한 것으로 나타났다(Darnley *et al.*, 1995; 이현구 외, 1999).

2-2. 시료채취

시료채취 대상수계는 원칙적으로 1:5만 지형도에 표시되어 있는 1차 수계를 대상으로 하되, 수계의 패턴과 밀도, 지형, 집수분지의 크기 등을 감안하여 2차 수계도 포함된다. 시료채취는 지역전반에 걸쳐 가능하면 고른 분포를 유지하였다. 그러나, 지형이 낮은 평야지대에서는 경작용으로 정리된 인공수계를 제외하면 자연수계의 밀도는 낮으며, 특히 대도시 주거지역이나 군사제한지역은 불가피하게 제외된 곳도 있다. 국토 서반부(면적: 45,000 km^2)의 탐사 하천수는 총 11,000 개로 평균 채취밀도는 4 km^2 당 1 개이다. 자연수계의 발달이 동부에서는 평균 2.5~3 km^2 당 1 개의 시료가 채취되었으나 서해안 쪽의 자연수계의 발달이 불량한 넓은 평야나 대도시 지역에서는 시료간격이 훨씬 커진다.

시료채취 대상 수계는 원칙적으로 상류의 집수분지의 면적이 100 km^2 를 넘지 않아야 하며, 표사는 하천바닥을 따라 흐르는 물에 의해 이동된 것이어야 한다. 시료채취에 있어서 가장 중요한 점은 한 수계에서 다섯 군데 이상의 지점에서 골고루 채취하여 하나의 복합시료로 합침으로써 상류 집수분지를 잘 대표할 수 있어야 한다는 점이다. 물이 말라 흐르지 않는 하천에서는 가장 최근에 쌓인 것을 채취하며, 상류 집수분지에서 유래되지 않고 제자리에서 침전되었거나 이차적으로 침전된 철(Fe)이나 망간(Mn) 산화물은 배제한다. 제방양쪽의 지형이 가파른 경우에는 제방에서 미끄러져 내려 온 물질은 피하고, 수로나 댐건설, 경지정리나 객토작업, 밭파 또는 골재채취 등 공사가 상류에서 진행중인 하천에서는 단거리 또는 거의 제자리에서 쌓인 토사는 피해야 한다. 논과 평야를 가로질러 흐르는 정리된 수로에서는 각종 생활오염으로 인한 미세한 부유물질이 많은데, 실트 크기 이상의 퇴적물과 골고루 혼합해서 채취한다.

조사자는 시료채취 시에 사용도구에서 페인트 등 인위적인 오염이 개입되지 않도록 최선을 다하여야 한다. 시료는 현장에서 물 속에서 채질(sieving)하여 100 메쉬의 표준망을 통과한 150 μm 이하의 세립질 입자만 채취한다. 회수량이 최소한 50-70 g 정도는 되게끔 반복해서 채질한다. 물 속에 떠 있는 미세한 부유입자도 버리지 않고 완전히 가라앉힌 후 함께 취하며, 조립질 입자가 혼입되면 분석결과에 오류를 초래하므로 유의한다.

시료채취는 가능하면 기후조건(특히 강우)이 유사한 짧은 기간에 일제히 실시하는 것이 바람직하다. 따라서, 많은 시료를 동시에 채취하기 위해서 한국자원연구소의 주관하에 권역별로 여러 대학교가 동시다발적으로 참여하였다.

2-3. 현장 측정 및 야외 정보수집

시료채취 시에는 하천수의 산도(酸度, acidity)를 알기 위해 수소이온농도(pH)를, 그리고

하천수내에 용해되어 있는 물질의 양을 이해하기 위하여 전기전도도(electric conductivity: EC)를 측정하였다.

정보의 수집은 분석자료의 해석 시에 중요한 참고자료로 이용되므로, 조사자는 시료채취 지점의 정보를 누구보다도 가장 가까이에서 접할 수 있으므로 가능하면 많은 정보를 수집하여 기재하여야 한다. 수집정보에는 하천수의 전기전도도, pH, Eh, 수온; 지질과 구성암석 암석의 풍화정도, 변질작용과 광화작용의 종류와 정도; 시료채취 지점의 양쪽 제방의 특징; 상류의 토지용도; 수계의 폭, 물의 깊이, 상대적 물높이, 유속 등 하천의 조건; 하천퇴적물의 색깔과 조성비율(자갈:조립사:세립사:실트:점토/뿔/유기물); 표사시료의 위치(중앙/좌측/우측)와 채취 깊이; 복합시료를 만들기 위하여 채취한 개별시료(subsample)의 구간과 시료수; 상류의 오염원 유무와 종류, 오염정도; 굽은 자갈 표면의 이차적 오염에 의한 착색·침전과 이끼 현상 등.

3. 시료분석과 품질관리

현장에서 채취하여 용기 속에서 가라앉은 표사시료는 바람이 잘 통하는 곳에서 햇빛에 잘 말린 후에, 균질하게 잘 섞어서 일부 시료를 아게이트 몰타르를 이용하여 74 μm (200 메쉬) 이하로 잘 연마하여 분석용으로 사용한다. 남은 시료는 용기에 담아서 영구 보관한다.

표사시료의 분석은 세 가지 분석패키지로 구분하여 실시하였다. ①주원소 성분인 규소(SiO_2), 티타늄(TiO_2), 알루미늄(Al_2O_3), 철(Fe_2O_3), 망간(MnO), 마그네슘(MgO), 칼슘(CaO), 나트륨(Na_2O), 칼륨(K_2O), 인(P_2O_5) 등 10종은 엑스선 형광분석법(X-ray fluorescence spectrometry: XRF, Shimadzu 사 MXF-2100)으로 분석하였다. ②미량원소 가운데 비소(As), 바륨(Ba), 베릴륨(Be), 비스무트(Bi), 카드뮴(Cd), 구리(Cu), 리튬(Li), 몰리브덴(Mo), 나이오븀(Nb), 니켈(Ni), 납(Pb), 스트론튬(Sr), 바나듐(V), 저어코늄(Zr) 등은 유도결합플라즈마 원자방출분광분석법(inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry: ICP-AES, JY38 plus)에 의해, 그리고 ③코발트(Co), 크롬(Cr), 세슘(Cs), 안티몬(Sb), 루비듐(Rb), 아연(Zn), 토륨(Th), 스칸듐(Sc), 세륨(Ce), 이테르븀(Yb), 하프늄(Hf), यू로퓸(Eu) 등은 방사화분석법(neutron activation analysis: NAA)에 의하여 분석하였다. 방사화 분석을 위한 중성자 조사는 한국원자력연구소의 하나로 원자로를 이용하였으며, 계측은 한국자원연구소의 HPGe 디텍터와 MCA 계측시스템을 이용하였다.

시료채취와 분석체계에서 발생할 수 있는 오차는 무작위로 선별한 시료들을 바탕으로 하여 모니터링한다. 오랜 기간에 걸친 분석에서 생길 수 있는 분석차이는 각 원소의 함량범위를 잘 대표하는 일련의 표준시료를 이용하여 실시한다. 많은 수의 시료의 체계적인 정도관리를 위하여 분석시료의 일정 배취마다 분석용 표준시료와 합성표준물질은 미국 지질조사소(USGS)와 표준국(NBS)의 표준물질 6종(BCR-1, DTS-1, PCC-1, NBS-76 외), 일본 지질조사소의 지구화학 표준시료 20종(JA-1, JB-1, JG-1,2, JR-1,2, JLS-1 외), 한국자원연구소의 국내산 암석 표준시료 6종(KG-1,2, KD-1, KB-1, KT-1 외)을 사용하여, 일련의 표준시료와 동일시료의 반복분석을 통해 분석치 정도관리에 노력하였다.

한편, 시료채취 시점에 따라 그 시료가 갖는 대표성의 변화 여부를 확인하고 시간의 경과에 따른 분석의 정확도를 검증하기 위하여, 탐사지역 전반에 걸쳐 무작위로 93개의 하천을 선정하여, 재분석 결과를 비교 검증하였다. 다른 조사자에 의해 1년 내지 3년 후에 새로 채취하여 동일한 방법으로 분석한 결과는 이전의 분석결과와 잘 일치한 것으로 판명되었다.

XRF에 의해 분석된 모든 주원소 성분 10종은 전반적으로 1:1 기준에 매우 잘 일치하는 것으로 밝혀졌다. 그러나, 일부 주거지역의 오염수계에서 채취한 시료에서는 Na_2O 등 일부 성분은 이차오염의 영향으로 작은 폭의 변화를 나타낸다. 한편 ICP-AES와 NAA법에 의해 분석된 미량원소 성분에 대한 분석결과도 비소, 카드뮴, 몰리브덴, 안티몬 등 모든 시료에서 매우 미량 검출되는 원소들의 경우에는 그 변화차이를 정확히 비교하기가 용이하지 않으나, 그 외 대부분 미량원소 성분들은 시간경과에 관계없이 1:1 기준선에서 매우 작은 차이를 나타낼 뿐 잘 일치하는 것으로 검증되었다. 특히 점토광물의 결정격자 내에 위치하는 루비듐(Rb)이나 저항력이 강한 저어코늄(Zr) 등은 거의 함량변화를 보이지 않는다.

따라서, 이 연구에서 대표시료로 선정된 하천퇴적물(150 μm 이하의 표사)은 그 대표성이 매우 우수하다고 볼 수 있으며, 시간의 경과에 따른 분석치의 정도관리도 매우 양호한 것으로 입증됨으로써, 현재 작성중인 하천퇴적물에 의한 지화학도 작성의 신뢰도는 매우 높다고 볼 수 있다.

4. 지구화학적 재해 평가를 위한 지화학도 작성

전산 지화학도의 이미지는 모든 시료에 대한 분석결과치와 시료채취 지점의 좌표 등 기본적인 전산자료를 바탕으로 보간(interpolation)법을 이용하여 작성하였다. 전산도면은 활용도를 극대화하기 위하여 다양한 유형으로 작성하여, 상설 web을 통해 검색할 수 있도록 하였다. 기본적인 지화학도는 단일 성분별로 작성되고, 필요시 그 형태와 내용을 다변화시켜 요인분석 결과에 근거하여 수반관계가 큰 성분들끼리 삼성분 이미지로 표현하였다.

4-1. 단성분 지화학도(single-component geochemical map)

경기-수도권 지역의 철(Fe_2O_3)과 전라남도의 구리(Cu)의 존재량과 분포상태를 나타낸 단성분 지화학도의 예는 각각 Fig. 1과 2와 같다.

지화학 자료는 보간법으로 프로세싱하여 각 원소별로 그리드를 만드는데, 각 그리드의 픽셀(pixel)은 지표 면적의 250×250 m 크기의 셀에 해당한다. 먼저 자료처리의 대상을 벗어나는 경계 밖이나 해안선에 관한 정보를 입력한 후에, 한 번에 250 m 씩 x축과 y축 두 방향으로 변량을 가지는 방정식을 써서 2 km 내에 인접하는 시료에 대해서는 중첩해서 그리드를 만들어 나간다. 따라서, 바다 쪽 또는 시료채취 밀도가 매우 낮은 평야지대에서는 한 시료지점에서 2 km 이상 떨어진 곳에 자료가 중첩되지 않을 경우도 있는데, 이런 지역은 '제로 값'으로 처리되어 공백처리(absent data) 함으로써, 자료의 정직성을 제고한 점이 특징이다. 그리드화 시킨 자료는 백분위수(percentile)에 따라 여러 색으로 분류한 이미지로 만든다. 대부분 주원소 성분과 미량원소는 백분위수 등급이 5, 10, 15, 25, 50, 75, 90, 95, 99로 구분된다. 그러나, 거의 대부분 시료가 분석측정한계 미만의 낮은 함량인 미량원소(예: 비소, 카드뮴, 몰리브덴, 비소 등)의 경우에는 백분위수의 등급수를 줄여서 잡아야 한다.

각 성분별 지화학도의 제작은 주원소 성분 10종과 미량원소 26종, 그리고 하천수의 전기전도도(EC), 수소이온농도(pH) 등 모두 38종에 대해 실시하였다. 아울러, 분석측정한계 미만의 낮은 함량을 보이는 비정상 분포를 보이는 미량원소들을 제외한 대부분의 주원소와 미량원소의 단성분 지화학 이미지는 별도로 A3 규격의 칼라채자로 작성하였다.

이와 같이 단성분 지화학도는 각 성분별 존재량과 분포상태를 그대로 잘 나타내므로, 지구화학적 재해의 요인으로 작용하는 유해원소가 과다농집된 지역이나 필수원소가 지나치게 결

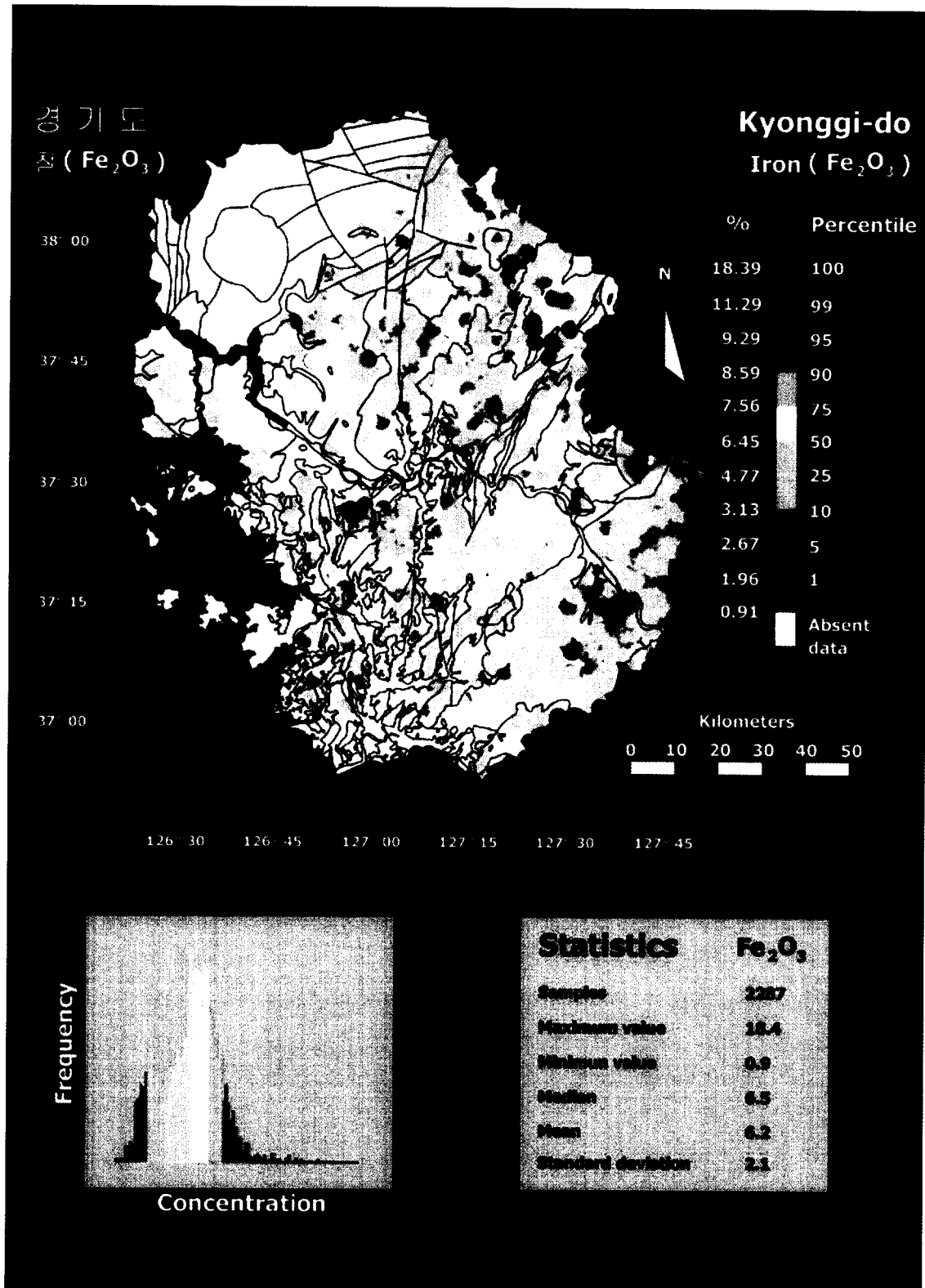


Fig. 1. Geochemical map for iron in stream sediment, Kyonggi-do. Geological boundaries and faults are shown in black line.

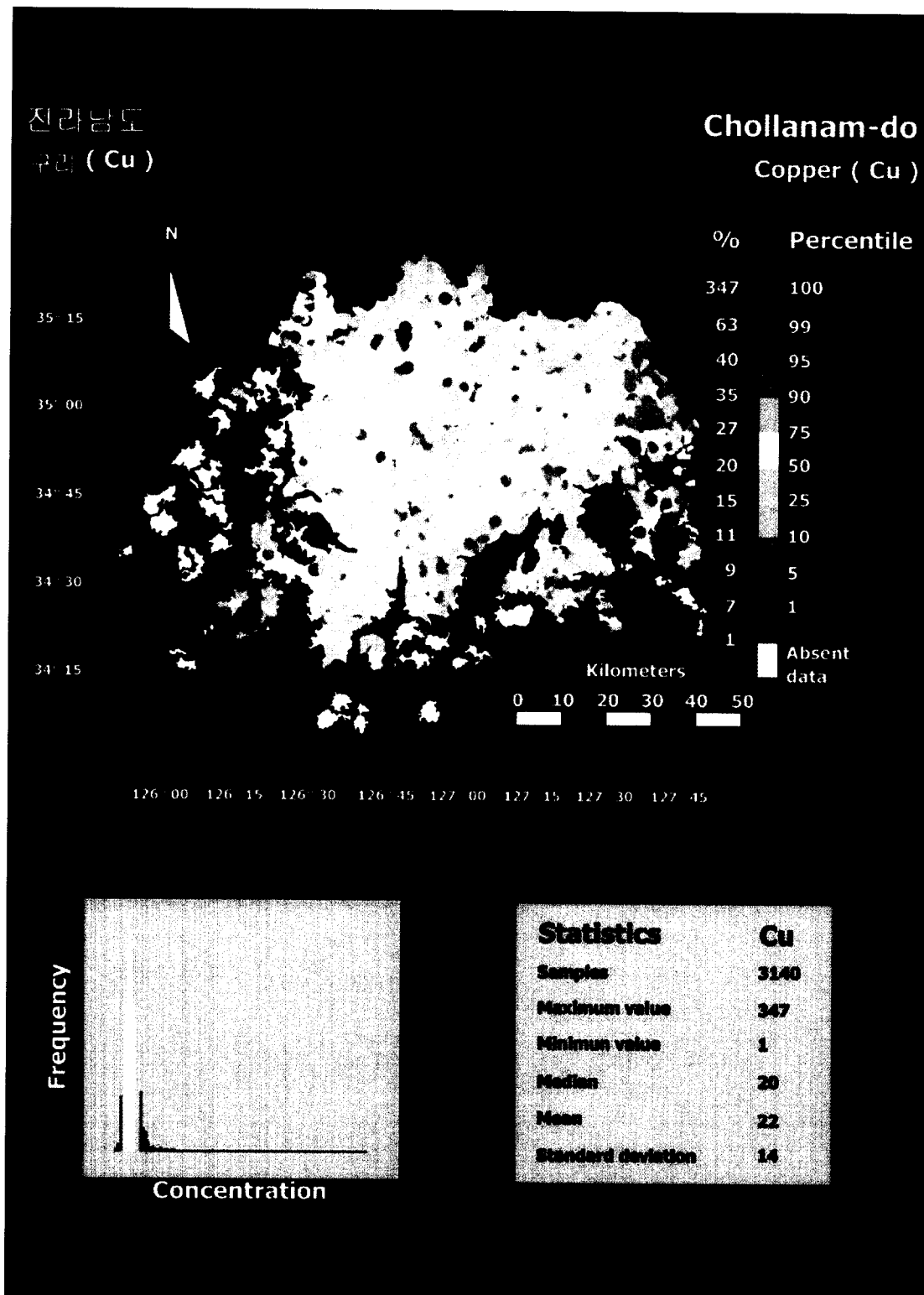


Fig. 2. Geochemical map for copper in stream sediment, Chollanam-do.

뽑힌 지역을 도출하고 지역별 재해등급을 평가하는 데에 매우 유효하다. 완성된 지화학도에 전산지질도를 중첩시켜 작성하면(예: Fig. 1), 지질에 따른 차별적인 분포상태를 더욱 쉽게 파악할 수 있다.

4-2. 삼성분 지화학도(three-component geochemical map)

삼성분 지화학도는 지구화학적 재해의 여러 요인들을 한꺼번에 나타내기 위하여 작성하는데, 그 표현기법은 목적에 따라 다양하다. ①백분위수(percentile)에 따라 성분들의 총합량을 등급화하여 나타내는 기법(예: Fig. 3과 4의 위쪽 그림)은 총합량에 해당하는 지구화학적 재해의 등급을 설정하는 데에는 적합하나, 단 성분과의 상관관계를 알아 보기 힘든 단점이 있다. ②빛의 삼원색인 적(Red)-녹(Green)-청(Blue)을 이용하여, 빛의 종류와 세기에 따라 표현하는 기법(예: Fig. 3과 4의 아래 그림)은 빛의 밝기에 따라 상관도를 알 수 있고, 빛의 색상으로 보아 원소들 간의 상관도를 쉽게 알아볼 수 있는 장점이 있다.

두 번째 방법에서 가장 높은 함량은 가장 밝은 세기의 빛으로 표현하고, 가장 낮은 함량은 빛의 세기를 최소화하여 나타낸다. 성분간의 복합은 적+녹=황, 적+청=마젠타(magenta), 청+녹=시안(cyan), 적+녹+청=가장 흰 빛깔로 표현되는 빛의 삼원색 이론에 따른다. 따라서, 상관관계가 높을수록 밝은 빛으로 나타나고(Fig. 3과 4의 아래 쪽 그림의 두 범례 중 위쪽 참조), 상관도는 좋으나 함량자체가 서로 낮은 경우에는 까만 빛으로 나타난다(아래쪽 범례). 한편, 함량이 지질(구성암석)의 성분을 잘 반영하여 정규분포에 가깝고 치우친 정도가 보통인 경우에는 삼성분 지화학도에서 빛의 범위도 매우 넓게 나타난다. 반면에, 불규칙적이거나 비정규분포를 하는 경우에는 대부분 어둡게 나타나며 일부만 강하고 밝은 빛을 보이므로 지구화학적 재해요인이 공통적으로 높은 위험지역을 도출하는 데에 매우 효율적이다. 이와는 반대로, 필수원소의 결핍재해를 평가하는 경우(Fig. 3)처럼, 세 성분의 상호관계는 좋으나 함량자체가 매우 결핍되어 있는 경우에는 까만 빛으로 나타나게 하였다(아래 범례 참조).

5. 지구화학적 평가기준치 설정

지표환경을 대표하는 각 시료로부터 취득한 현재의 분석결과치를 바탕으로 하여, 여러 가지 목적에 부합하는 평가를 실시하기 위해서는, 무엇보다도 그 평가의 기준 잣대가 될 수 있는 정량·정성적인 기준치가 설정되어야만 한다. 이러한 계량화된 척도를 정하기 위해서는 각 분석 결과치에 근거한 각 성분별 최고치, 최저치, 중간치(median), 산술평균치(arithmetic mean), 표준편차 등을 구하여 평가기준치로 제시하였다. 분석치의 통계처리 시에는 반드시 요인분석을 실시하여 성분간의 상관관계를 규명하여야 한다.

이 사업에서 제시하는 자연 배경치와 기준치 등 계량화된 지구화학적 척도는 국토의 자연환경에서 진행되고 있는 각종 지구화학적 재해와 이차 오염의 평가에 정량·정성적인 척도로 적용할 수 있을 것이다.

5-1. 지질환경별 자연 배경치

지구화학적 평가에 있어서 가장 기본이 되는 값은 구성암석(지질)별로 본래 함유되어 있는 자연 배경치(natural background)와 그 범위이다. 배경치란 인위적 영향을 배제한 자연 물질인 지표지각내 들어 있는 원소의 함량을 뜻하며, 근본적으로 지질(구성 암석)의 종류에 따라 각각 다르며, 특정 암석별로 구성광물 성분 에 따라 본래 고유한 값을 가진다.

Table 1은 국토 서반부에서 단일지질을 대표하는 시료만을 엄선하여 설정한 원소별 자연 배경치 가운데 일부 유해원소와 필수원소에 대한 예이다. 배경치는 시료가 대표하는 집수분지가 한 종류의 단일지질 내에서 집적된 경우만을 엄선하여, 통계분포에서 50%에 해당하는 중간치(median)로 설정하였다. 중간치는 통계결과가 정규분포에 가까울 때에는 산술 평균치(mean)와 거의 같지만, 분포가 매우 낮거나 높은 함량 쪽에 많이 치우칠 경우에는 큰 차이를 보인다.

Table 1. Natural backgrounds for stream sediments over different geological units.

area	Geology	No. of samples	CaO	MgO	K2O	Na2O	Fe2O3	Cu	Pb	Zn	Co	Cr	Ni	V
G	metamorphic rocks	1004	1.2	1.8	3.3	1.4	7.0	43	35	127	16	110	35	82
JB	gneiss	183	1.5	1.5	3.1	1.8	5.5	17	18	101	15	83	20	53
JN	gneiss	487	0.9	1.5	3.2	1.1	6.8	26	21	100	16	106	32	73
G	igneous rocks	479	1.1	0.6	3.8	2.8	4.1	36	48	112	6	43	16	54
G	Seoul Granite	51	1.1	0.5	3.4	3.8	5.3	56	50	152	5	47	18	79
G	Kwanaksan Granite	9	0.6	0.3	3.8	5.2	2.0	21	25	169	3	35	10	18
CB	Jurassic granites	187	1.5	1.1	3.6	2.7	4.7	32	22	102	8	47	26	42
CN	Jurassic granites	113	1.2	1.2	3.6	1.9	5.1	18	23	113	10	54	14	56
G	volcanic rocks	23	0.7	2.5	3.4	1.8	4.3	24	27	118	8	53	15	49
JB	volcanic rocks	64	0.7	0.9	3.0	1.2	4.0	19	19	110	8	46	17	56
JN	volcanic rocks	105	0.9	1.0	2.6	1.2	5.5	17	19	86	10	51	14	70
JB	limestone(n=3)	3	1.4	1.4	3.4	0.7	4.4	23	10	110	11	64	52	75

unit: major oxides in %, trace elements in ppm. area: G=Kyonggi-do, CB=Chungchongbuk-do, CN=Chungchongnam-do, JB=Chollabuk-do, JN=Chollanam-do

같은 종류의 화강암류일 지라도 지역에 따라 지질단위에 따라 배경치가 서로 다르다. 서울-의정부-포천에 걸쳐 분포하는 서울화강암체와 서울-안양일대의 관악산화강암체는 비슷한 수준의 배경치를 가지지만, 일부 원소에서는 서로 다르다. 대부분 국내 화강암의 주성분은 세계 평균치와 거의 유사한 수준이나, 구리(Cu), 납(Pb), 아연(Zn), 크롬(Cr), 니켈(Ni) 등 중금속 원소들은 세계 평균값에 비해 배경치가 높은 특징이 있다. 국내의 화강암류가 분포하는 지역은 오염되지 않은 곳이라 할지라도 원래 암석 내에 함유된 중금속의 배경치가 비교적 높음을 알 수 있다. 특히 아연의 배경치는 2-3배 정도이다(Table 2). 표에서 굵은 글씨체는 국내 화강암의 값이 세계 화강암 평균치에 비해 높은 것을 뜻하며, 이태릭체는 그보다 낮은 것을 뜻한다.

그러므로, 지역에 따라 다르게 나타나는 존재량의 평가 시에는 반드시 자연 배경치가 가장 근본적으로 고려되어야만 한다

5-2. 권역별 중간치와 평균치

일반적으로 지표환경에서는 위와 같이 정상적인 지질구성에만 좌우되지 않고, 특정 중금속 등이 자연적으로 이상농집된 광화대나 이차적으로 인위적 오염 등이 복합적으로 반영되는 경우가 허다하므로, 이러한 요인들을 모두 합축하여 평가지침으로 사용할 수 있는 기준치(baseline)가 별도로 설정되어야 한다. 기준치란 한 특정 시점에 측정된 원소별 존재량을 가리키는데, 여기에는 그 시점에서의 인위적 영향까지 포함된다. 따라서, 자연 배경치는 지역별, 지질별로 고유한 특정 범위의 값을 가지지만, 모든 시료에 대한 현지점에서의 기준치는 이차적인 영향 등 자연환경에서의 성분변화에 따라 가변적이다.

Table 2. A comparison of natural background levels of some components in granites.

Geology	sample medium	CaO	MgO	K2O	Na2O	Cu	Pb	Zn	Co	Cr	Ni	V
Seoul Granite	stream sediment	1.1	0.5	3.4	3.8	56	50	152	5	47	18	79
Kwanaksan Granite	stream sediment	0.6	0.3	3.8	5.2	21	25	169	3	35	10	18
Jurassic granites, Chollabuk-do	stream sediment	1.5	1.1	3.6	2.7	32	22	102	8	47	26	42
Jurassic granites, Chollanam-do	stream sediment	1.2	1.2	3.6	1.9	18	23	113	10	54	14	56
bulk continental crust*	rock	4.15	2.33	2.09	2.36	60	14	70	25	102	84	120
upper continental crust*	rock	3.0	1.33	2.8	2.89	25	20	71	10	35	20	60
granite, granodiorite**	rock	0.9	0.5	3.3	2.5	12	20	50	4	10	5	70

unit: major oxides in %, trace elements in ppm.

*Lide(1996), **Taylor and McLennan(1995), ***Koljonen(1992)

Table 3. Baseline statistics on total samples from different provinces.

area	statistics	CaO	MgO	K2O	Na2O	Fe2O3	Cu	Pb	Zn	Co	Cr	Ni	As	Cd
Kyonggi-do (n=2294)	maximum	22.4	12.6	6.0	5.9	18.4	750	624	6820	58	507	150	288	37
	minimum	0.2	0.1	1.5	0.5	0.9	8	10	<1	<1	12	<1	<1	<1
	median	1.2	1.6	3.5	1.6	6.5	40	41	122	14	92	29	1	1.2
	mean	1.4	1.6	3.5	1.9	6.2	51	42	145	13	97	32	6.6	1.6
	std. deviation	2.1	0.9	0.7	0.9	2.1	41	20	169	7	56	18	25	1.1
Chungchong buk-do (n=2081)	maximum	47.8	17.0	6.3	4.7	33.4	2104	221	17000	68	1500	293	40	27
	minimum	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	1	1	7	1	10	1	1	1
	median	1.3	1.6	3.2	1.5	5.8	28	25	108	13	76	23	1	1
	mean	2.4	2.1	3.1	1.6	6.1	33	25	138	14	84	25	1.1	1.2
	std. deviation	4.0	1.8	0.8	0.9	2.7	55	10	409	8	60	17	1.6	0.9
Chungchong nam-do (n=1711)	maximum	26.7	10.2	7.5	4.9	14.7	1190	198	17100	141	1470	329	94	66
	minimum	0.1	0.3	0.9	0.4	1.6	1	4	<1	2	7	1	1	1
	median	1.0	1.5	3.4	1.4	5.7	21	26	101	13	82	21	1	1
	mean	1.3	1.6	3.4	1.5	5.8	27	28	128	14	98	23	1.2	1.3
	std. deviation	1.1	0.9	0.8	0.6	1.6	36	15	427	8	96	18	3.6	1.6
Chollabuk-do (n=2082)	maximum	14.4	11.8	6.5	4.6	39.8	493	88	4880	78	384	202	8.1	17
	minimum	0.1	0.2	0.8	0.3	1.4	4	2	19	1	7	2	1	1
	median	1.0	1.1	3.2	1.5	4.9	18	20	103	10	49	18	1	1
	mean	1.3	1.3	3.2	1.6	5.2	21	18	136	12	60	19	1	1
	std. deviation	1.1	0.8	0.7	0.6	1.9	20	7	204	8	39	11	0.2	0.5
Chollanam-do (n=3142)	maximum	29.6	5.0	6.1	5.8	14.5	347	89	16900	1170	5720	336	1100	7.7
	minimum	0.1	0.2	0.7	0.3	0.9	1	1	2	1	11	2	1	1
	median	0.8	1.2	3.0	1.1	5.7	20	19	99	12	61	18	1	1
	mean	1.0	1.2	3.1	1.1	5.9	22	19	130	13	76	22	1.4	1
	std. deviation	0.8	0.5	0.6	0.4	1.8	14	7	397	27	137	16	396	0.2

unit: major oxides in %, trace elements in ppm. n=number of samples(stream sediment)

국토 서반부의 5개 권역에서 채취한 모든 시료들에 대해서, 대표적인 필수영양원소와 유해 중금속 원소에 대한 최고-최저치, 중간치, 평균치, 표준편차 등 통계분석자료를 비교하면 Table 3과 같다. 중간치는 각 권역별로 전역에 걸쳐 채취한 시료의 50%가 갖는 값을 의미한다. 모든 시료는 성분에 따라 함량분포가 불규칙적인 경우가 많으므로, 산술 평균치(mean)는 중간치와 차이가 난다. 따라서, 모든 시료의 중간에 해당하는 50%의 중간치를 평균 기준으로 설정하는 것이 바람직하다. 대부분 필수영양원소는 권역에 관계없이 비슷한 정도로 서로 잘 비교된다. 중금속 성분의 경우에는 각 도별로 큰 차이를 나타내지는 않지만, 특히 경기-수도권 지역에서는 다른 도에 비해 뚜렷하게 높은 경향이 있다.

5-3. 유해 중금속의 과다농집 재해 평가기준치

각 권역별로 유해 중금속 원소에 대한 재해등급은 함량분포의 통계분석에 근거하여, 백분위수(percentile) 5%, 50%, 95%를 기준으로 하여, 4개의 등급으로 구분하였다(Table 4).

Table 4. Classification for baselines of heavy metal enrichments.

area	baseline	Cu	Pb	Zn	Co	Cr	Ni	V
Kyonggi-do (n=2294)	Class I	>120	>70	>285	>25	>190	>65	>190
	Class II	40-120	40-70	120-285	15-25	90-190	30-65	75-190
	Class III	20-40	25-40	55-120	5-15	25-90	10-30	30-75
	Class IV	<20	<25	<55	<5	<25	<10	<30
Chungchong buk-do (n=2081)	Class I	>60	>40	>245	>30	>160	>50	>135
	Class II	30-60	25-40	110-245	15-30	75-160	25-50	60-135
	Class III	5-30	15-25	60-110	5-15	30-75	5-25	20-60
	Class IV	<5	<15	<60	<5	<30	<5	<20
Chungchong nam-do (n=1711)	Class I	>55	>55	>220	>20	>185	>45	>105
	Class II	20-55	25-55	100-220	15-20	80-185	20-45	50-105
	Class III	10-20	10-25	45-100	5-15	30-80	5-20	20-50
	Class IV	<10	<10	<45	<5	<30	<5	<20
Chollabuk-do (n=2082)	Class I	>40	>30	>280	>30	>50	>35	>100
	Class II	20-40	20-30	100-280	10-30	50-135	20-35	55-100
	Class III	10-20	5-20	50-100	5-10	20-50	5-20	15-55
	Class IV	<10	<5	<50	<5	<20	<5	<15
Chollanam-do (n=3142)	Class I	>40	>30	>255	>22	>145	>45	110
	Class II	20-40	30-30	100-255	10-20	60-145	20-45	65-110
	Class III	10-20	10-20	50-100	5-10	25-60	5-20	25-65
	Class IV	<10	<10	<50	<5	<25	<5	<25

unit in ppm, n=number of samples(stream sediment)

①등급 I은 중금속의 분포정도가 매우 높은(very high) 지역에 대한 등급으로, 백분위수 95% 이상인 지역에 해당한다. 이 지역은 중금속의 과다분포가 명백한 지역으로서 자연적인 재해인지 인위적인 오염인지의 여부를 반드시 규명해야 하며, 심한 지역에 대해서는 우선적으로 과다농집으로 인한 재해 대응차원에서 대책수립이 뒤따라야 한다.

②등급 II는 백분위수 50%부터 95%까지의 중간 내지 높은(high to moderate) 지역에 해당하며, 많은 지역은 중금속 성분의 확산이 우려되므로 후속조사가 필요하지만, 경제적인 여건을 고려하여 허용될 수도 있는 등급을 가리킨다.

③등급 III은 백분위수 50%의 중간치 이하로 낮거나 중간 정도인(moderate to low) 지역에 해당하며, 많은 부분이 안전영역에 가깝지만 중간치에 근접하는 지역에 대해서는 원인 분석을 할 필요도 있다.

④등급 IV는 백분위수 5% 이하의 매우 낮은(very low) 등급으로 후속조사가 필요 없는 소위 안전한 등급이다. 그러나, 중금속에 해당하는 원소라도 일면으로는 사람과 동식물에 적당한 양이 필요하므로, 너무 결핍되는 현상도 바람직하지 않다.

5-4. 필수영양원소의 이상결핍 재해 평가기준 설정

마그네슘(Mg), 칼슘(Ca), 칼륨(K) 등과 같은 필수영양원소(nutrient element)의 경우에는, 앞에서 말한 유해원소의 경우와는 반대로, 해당 성분이 지나치게 적은 경우에 생물체에

재해요인으로 작용하게 된다. 따라서, 필수영양원소의 결핍등급의 구분은 다음과 같이 정의된다.

Table 5. Classification for baselines of nutrient deficiencies.

area	baseline	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃
Kyonggi-do (n=2294)	Class IV	>3	>3	>5	>4	>9.5
	Class III	1-3	1.5-3	3.5-5	1.5-34	6.5-9.5
	Class II	0.5-1	0.5-1.5	2.5-3.5	1-1.5	2.5-6.5
	Class I	<0.5	<0.5	<2.5	<1	<2.5
Chungchongbuk-do (n=2081)	Class IV	>8	>5.5	>4.5	>3.5	>10
	Class III	1-8	1.5-5.5	3-4.5	1.5-3.5	6-10
	Class II	0.5-1	0.5-1.5	2-3	0.5-1.5	3-6
	Class I	<0.5	<0.6	<2	<0.5	<3
Chungchongnam-do (n=1711)	Class IV	>3	>3	>5	>2.5	>8.5
	Class III	1-3	1.5-3	3.5-5	1.5-2.5	5.5-8.5
	Class II	0.5-1	0.5-1.5	2.5-3.5	0.5-1.5	3-5.5
	Class I	<0.5	<0.5	<2.5	<0.5	<3
Chollabuk-do (n=2082)	Class IV	>3	>2.5	>4.5	>3	>8.5
	Class III	1-3	1-2.5	3-4.5	1.5-3	5-8.5
	Class II	0.5-1	0.5-1	2-3	0.5-1.5	3-5
	Class I	<0.5	<0.5	<2	<0.5	<3
Chollanam-do (n=3142)	Class IV	>2.5	>2	>4	>1.5	>9
	Class III	1-2.5	1-2	3-4	1-1.5	5.5-9
	Class II	0.5-1	0.5-1	2-3	0.5-1	3.5-5.5
	Class I	<0.5	<0.5	<2	<0.5	<3.5

unit in %, n=number of samples(stream sediment)

①등급 I은 필수영양원소가 매우 낮은(very low) 지역으로 백분위수 5% 이하인 지역에 해당한다. 원소성분이 미량인 이유는 일차적으로 그 지역에 분포하는 지질(구성암석) 자체에 기인하는 경우가 많은데, 결핍정도가 비정상적으로 심한 등급 I의 지역은 산림과 토지의 효율적 이용과 사람이나 동식물에 미치는 영향에 관하여 반드시 대응이 필요하다.

②등급 II는 영양원소가 낮거나 중간 정도인(low to moderate) 경우로, 백분위수 5%부터 중간치(50%)까지의 범위에 해당한다. 특히 등급 I에 근접하는 지역에 대해서는 결핍현상의 원인에 대한 주의가 요망된다.

③등급 III은 영양원소의 함량이 중간 내지 높은(moderate to high) 등급이며, 백분위수가 중간치 이상 95%이하인 지역에 해당한다. 이 등급의 지역은 필수영양원소의 공급은 양호한 지역이다.

④등급 IV는 백분위수 95% 이상의 매우 높은(very high) 등급으로, 필수원소들의 공급이 매우 높아, 오히려 과다공급에서 오는 불균형이나 해로운 영향에 관한 검토가 요구된다.

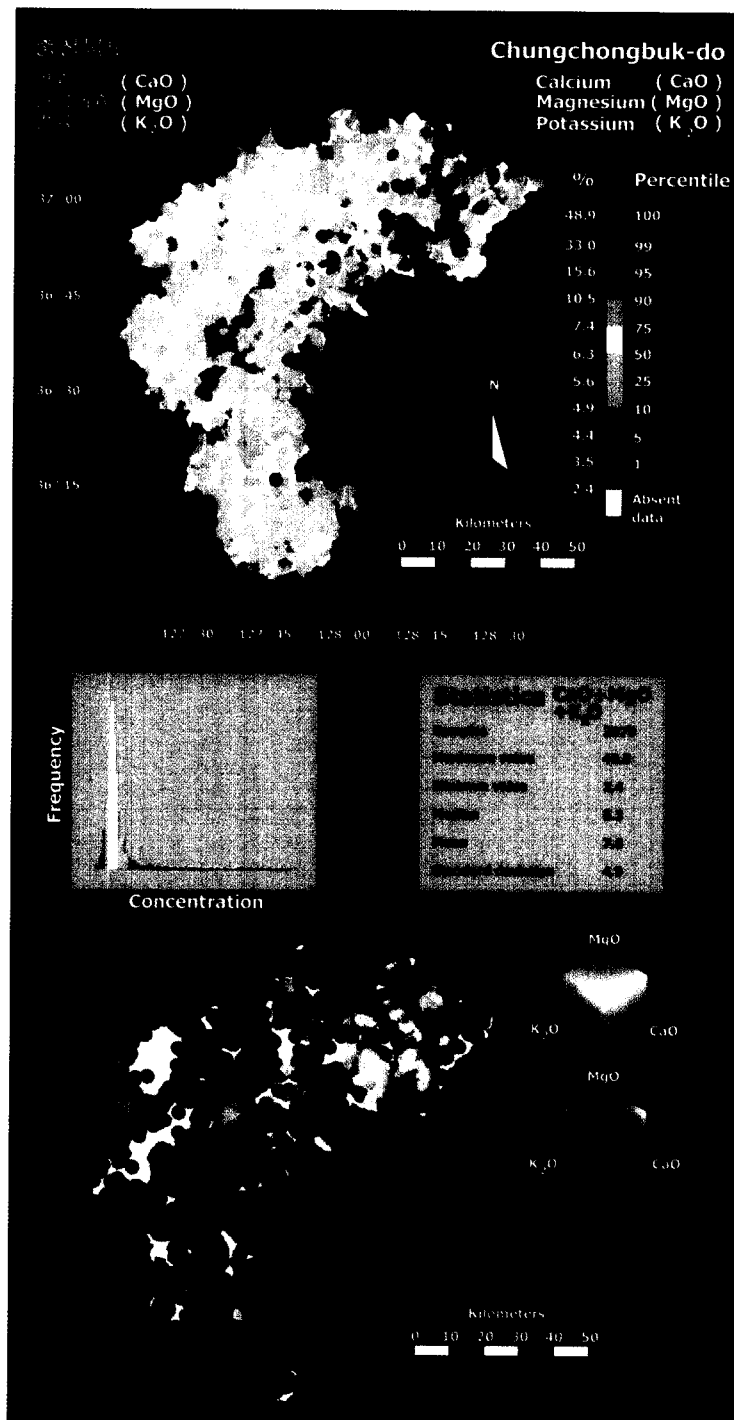


Fig. 3. Composite geochemical map for magnesium, calcium and potassium in stream sediment, Chungchongbuk-do. Upper: based on total concentrations, Lower: by combining the scaled monochrome, red, green and blue geochemical images.

6. 국토 서반부 지구화학적 재해의 유형별 평가 예

일반적으로 특수성분의 지구화학적 재해는 유독한 원소의 과다농집으로 인한 것부터 연상하게 되는데, 동식물과 사람에게 필수영양원소의 지나친 결핍현상 역시 매우 중요하다. 대부분 유해원소에 의한 지구화학적 재해는 주로 지표부근에 자연적으로 농집되어 형성된 광산과 광화대에서 과다농집된 중금속 등 유독물질이 분산됨으로써 발생하는 것으로 인식되고 있지만, 실제로는 구성암석 자체의 지나치게 높은 자연배경치와 이차적인 인간활동 등 복합적인 요인도 매우 많다. 한편, 필수영양원소의 지나친 결핍에 따른 재해는 근본적으로 지각을 구성하고 있는 암석이 비정상적으로 낮은 함량을 함유하는 자연적인 현상인 경우가 대부분이다.

이 장에서는 국토 서반부 전역에 대해 작성한 원소별 지화학도와 여러 기법으로 작성한 복합 지화학 이미지, 그리고 성분별로 설정한 배경치와 평가기준치 등을 바탕으로 하여, 지구화학적 재해의 몇 가지 실 예를 들어 설명한다.

6-1. 칼슘-마그네슘-칼륨의 이상결핍

충청북도의 경우, 생물체에 필수적인 영양을 공급하는 원소들 가운데 칼슘(Ca), 마그네슘(Mg), 칼륨(K)은 하천퇴적물 내에 각각 평균 1.3%, 1.6%, 3.2% 존재한다. 이 값은 중간치로 설정한 평가기준이다(Table 4). 지각 암석의 평균치가 각각 4.15%, 2.33%, 2.09%(Table 2)인 것을 고려하면, 충청북도의 하천퇴적물 내 칼슘과 칼륨의 함량은 낮은 편이며, 특히 칼슘의 결핍현상이 큰 편이다.

이 세 가지 필수성분의 결핍현상을 복합적으로 도출하기 위하여, 삼성분 지화학 이미지(Fig. 3)로 표현하면, 위쪽 그림에서는 세 가지 성분의 총합량의 백분위수로부터 결핍등급별 지역을 분류해 낼 수 있다. 예를 들어, 충청북도의 동북부인 단양군과 제원군의 석회암 분포 지역을 중심으로 총 함량이 10% 이상 높은 지역이 있는 반면에(Fig 3 위쪽 그림의 적색 내지 오렌지색), 청주 동남부 청원군일대의 육천계 지층 분포지역에서는 4%에도 못 미치는 지역(그림에서 청색부분)도 있다.

이러한 결핍현상이 세 성분 가운데, 어떤 성분에 주로 좌우되는 지를 알아내는 데에는 빛의 삼원색의 합성 이미지인 아래쪽 그림이 더 효율적이다. 즉, 칼슘-마그네슘-칼륨의 복합적 결핍현상이 가장 두드러진 청원군일대는 Fig. 3 아래 그림에서 탁하고 어두운 녹색 빛으로 나타나므로 주로 마그네슘과 칼슘의 결핍현상에 기인함을 알 수 있다. 이 그림에서 청색 빛이 두드러진 곳은 칼륨이 다른 두 성분에 비해 훨씬 풍부한 지역임을 지시한다. 세 성분이 매우 높게 분포하는 충청북도의 동북부지역은 마그네슘과 칼슘이 공통적으로 풍부하고(황색 빛), 칼륨은 상대적으로 낮은데, 이는 석회암분포에 전적으로 기인한다.

마그네슘과 칼슘의 결핍현상이 두드러진 지역에서는 식물의 발육저해와 다양한 인체 질병의 유발 가능성이 기재되어 있으므로(임연풍, 1996), 지구화학적인 재해 차원에서 체계적인 대응이 필요하다. 적어도 칼슘(CaO)과 마그네슘(Mg)이 각각 0.5% 이하인 결핍등급 I(Table 5)에 해당하는 지역은 지구화학적 재해 차원에서의 대응책이 필요하다.

6-2. 철의 이상결핍과 과다농집

모든 생물체가 살아가는 데에 있어서 꼭 필요한 성분인 철(Fe)은 토양의 성질을 변화시켜 식물의 성장에 큰 영향을 미친다. 그러나, 자연환경에서 철성분을 과다섭취하는 것은 매우 해롭다. 지각 내 철의 평균함량은 5.63%(Lide, 1996), 토양 내의 세계 평균치는 3.5% 정

도이다(Koljonen, 1992). 과거부터 오래 동안 철은 매우 유용한 산업자원으로 널리 쓰이므로 철광상의 개발에 대한 노력이 지대하였으나, 오늘날에는 철광상의 개발은 지질재해의 한 분야로 나타나고 있다.

경기도에 대한 철의 필수원소로서의 결핍현상에 관하여 예시한다. Fig. 1은 경기-수도권 지역의 2,287개 하천퇴적물을 대상으로 작성한 철(Fe_2O_3)의 존재량과 분포상태를 나타낸 단성분 지화학도이다(진명식 외, 1998; Shin *et al.*, 1999). 서울-의정부-포천에 걸쳐 분포하는 서울화강암과 경기도 동남부의 여주-장호원 일대에 넓게 분포하는 주라기 화강암체는 전반적으로 경기도 전역의 평균기준치(6.5%, Table 3 참조)에 훨씬 못 미치는 철을 함유하는 것이 특징적이다. 이러한 경향은 Fig. 1에서 청색부분으로 선명하게 구분된다. 철의 함량이 낮은 주라기 화강암 지역 가운데에서, 철의 결핍등급 I(2.5% 이하)에 해당하는 지역은 여주군의 남한강 서남부, 포천군 백운산과 그 남부, 그리고 관악산일대 등으로, 모두 주라기 화강암 분포지역이다(그림에서 짙은 청색). 철함량이 2% 이하로 심하게 결핍된 집수분지도 25개 계곡에 이른다. 결론적으로, 경기도의 철 결핍현상은 분포 지질 자체가 매우 낮은 철함량을 가짐으로써 나타나는 것이므로, 지질재해의 차원에서 식생과 인체에 나쁜 영향을 미칠 것에 대비해야 할 것으로 판단된다. 특히, 해당지역 내에서는 철 결핍현상의 극복을 위해서는 $FeSO_4$ 성분의 공급도 고려할 수 있다(임연풍, 1996; Reimann and Caritat, 1998).

철은 결핍되어도 좋지 않지만, 과잉될 경우에도 유해하다. 경기도에서, 철이 많이 함유된 지질은 대부분 변성암 지역이며, 주로 가평군 일대와 일부는 포천군 북부에서는 철 성분이 등급 IV(9.5% 이상)에 해당하여 과다한 것으로 나타났다(Fig. 1의 짙은 적색). 가평지역에는 원생대의 변성암 복합체 내에 유색광물을 다량 함유하는 변성암이 분포하며 금은광산으로 등록된 금속광산이 밀집되어 있다. 포천군의 관인면 일대에는 고남산각섬암이 분포하는데, 다량의 Ca-각섬석, 휘석과 미량의 일메나이트, 티탄철석 등을 수반한다. 이 일대에는 비교적 큰 규모의 철광화대가 형성되어 있는데, 예를 들어 고남산 철광산은 함-티타늄 자철광상을 배태하며, 주변의 각섬암에는 티탄함량(0.8-2.08 wt.% TiO_2)이 풍부하다(장호완 외, 1987). 따라서 이 지역에 형성되는 철 이상대는 주로 이미 개발된 철광산에서 철광석과 철마그네슘 규산염 광물(각섬석, 흑운모, 휘석 등) 내에 주구성 원소로 산출되는 철성분이 용해되어 분산된 것으로 해석된다. 이러한 지역에 대해서는 철성분의 과잉확산에 대비한 자연환경 관리대책이 필요한 것으로 판단된다. 기존의 광산개발이 알려져 있지 않은 일부 지역에서 형성된 철 이상대는 새로운 철 광상의 부존 가능성을 시사한다.

6-3. 구리의 이상결핍과 과다농집

Fig. 2는 전라남도 전역에 분포하는 3,140개의 1-2차 수계에 퇴적된 하천퇴적물을 대상으로 작성한 구리(Cu) 지화학도이다. 구리도 철과 마찬가지로 모든 생물체에 필요한 원소로서, 지각 내 평균함량은 60 ppm(Lide, 1996)이며, 토양 내의 세계 평균치는 25 ppm 정도이다(Koljonen, 1992). 전라남도 전역의 하천퇴적물을 대상으로 한 구리 평균기준치는 20 ppm로 설정된다(Table 4). 전라남도에서 평균기준치에 훨씬 못 미치는 구리를 함유하는 지역은 다양한 백악기의 화산쇄설암과 용암으로 구성된 화산암류 분포지역으로 한정된다(Fig. 2에서 청색계통). 그 가운데에서 특히 구리의 결핍이 심하여, 결핍등급 I(10 ppm 이하)에 해당하는 지역은 진도 전역과 영광군, 고흥반도, 여수반도의 일부 지역이다. 결론적으로, 전라남도에서 나타나는 구리 결핍현상은 원래 구성암석 자체가 매우 낮은 구리 함량을 가짐에 기인하는 일종의 지구화학적 재해이다. 결핍등급 I에 해당하는 지역에서는 산림 등 식생과 토

지이용 시에 구리결핍에 대비한 조치가 뒤따라야 할 것으로 판단된다.

한편, 구리성분은 과다하게 분포하면, 생물체에 유독하다. 최근에는 광산지역을 중심으로 진행되는 자연적인 확산은 물론, 플라스틱과 철강산업 등 이차적인 확산까지 겹쳐 환경 문제로 거론되고 있다. 인간의 주거활동과 양돈 성장촉진제 사용 후의 오물 찌꺼기를 경작지에 비료로 사용하는 경우에도 매우 높은 구리성분의 증가를 가져 올 수 있다(Reimann and Caritat, 1998). 분포도(Fig. 2)에서 볼 수 있듯, 광양시의 넓은 지역과 장성군의 일부 지역에서는 구리함량이 등급 IV(40 ppm 이상)를 초과한다(그림에서 짙은 적색). 이러한 구리함량의 과다현상은 현장조사 결과, 여러 요인에 기인하는 것으로 파악되었다. 첫째, 구리의 과다하게 확인된 지역은 광양시, 여수반도, 돌산도 등의 도처에 산재하는 동광산과 기타 금속광산의 주변지역으로, 구리함량은 70 ppm 이상, 최고 347 ppm에 이른다. 폐광산에서 황철석(pyrite)과 같은 황화광물이 하천을 따라 이동되는데 이러한 쇄설성 구리는 pH 5.0 이하의 산성폐수에서는 비교적 빨리 용해되어 확산된다. 폐광산 주변의 구리확산 이외에, 전라남도에서는 주거생활과 양돈, 산업시설에 의한 이차적 오염에 의한 구리의 오염도 도처에서 확인된다.

6-4. 코발트-크롬-니켈의 과다농집

크롬(Cr)은 일반적으로 지표환경에서 용해도가 낮으며, 특히 +6가 상태의 크롬은 수생생물에 매우 유독하다. 코발트(Co)는 다량섭취 시에는 생물체에 유독하나, 일반적으로는 필수원소로서 그 결핍현상에 더 치중해서 고려한다. 니켈(Ni)은 생물체에 필요한 원소이지만 과다하거나 +2가 상태 외의 화합물 형태로 존재할 경우에는 매우 유독하다. 이 세 가지 원소는 자연에서 서로 매우 높은 수반관계를 보인다. 코발트와 니켈은 지표의 산화환경이나 산성조건에서 비교적 잘 용해되며, 크롬은 풍화에 매우 강하여 용해속도가 매우 느리다. 요인분석 결과 크롬과 니켈은 특히 높은 수반관계를 보인다.

충청북도 전역에서 채취한 하천퇴적물 내 코발트-크롬-니켈함량의 평균치는 중간치를 기준으로 각각 13-76-23 ppm이다(Table 3). 세 원소의 유해등급(Table 4)에 바탕을 두면 세 원소의 총합량은 220 ppm을 초과할 경우에는 유해등급 I로 분류된다. 이 세 원소의 지각 내 평균함량은 각각 25-102-84 ppm이며(Lide, 1996), 토양의 세계 평균은 각각 10-80-20 ppm(Koljonen, 1992)이다.

충청북도에서 이들 세 원소가 가장 심하게 농집된 지역은 서북단 도 경계를 따라 진천군 서부와 청원군 북서부에 분포하는 선캠브리아기 변성암 분포지역, 그리고 괴산군의 일부 옥천계 지층 분포지역으로, 세 원소의 총합량이 평균치(106 ppm)의 2-3배 또는 그 이상에 달한다(Fig. 4에서 연한 푸른 빛). 이와 같이 세 가지 원소가 높은 원인은 변성암 내에 풍부하게 함유된 유색광물에 기인한다. 특히 코발트는 철망간 규산염광물, 산화물, 황화물 등 일차광물에, 그리고 크롬은 주로 크롬석($FeCr_2O_4$), 일메나이트(티탄철석: ilmenite), 자철석 산화물에 기인하는 것으로 해석된다. 일부 금은광화대 주변에서는 크롬과 니켈이 밀접하게 수반된다. 반면에 청주-충주를 거쳐 북동방향으로 분포하는 유라기 화강암 지역은 중간치 또는 그보다 약간 적은 함량에 불과하다(Fig. 4 아래 그림에서 탁한 녹색).

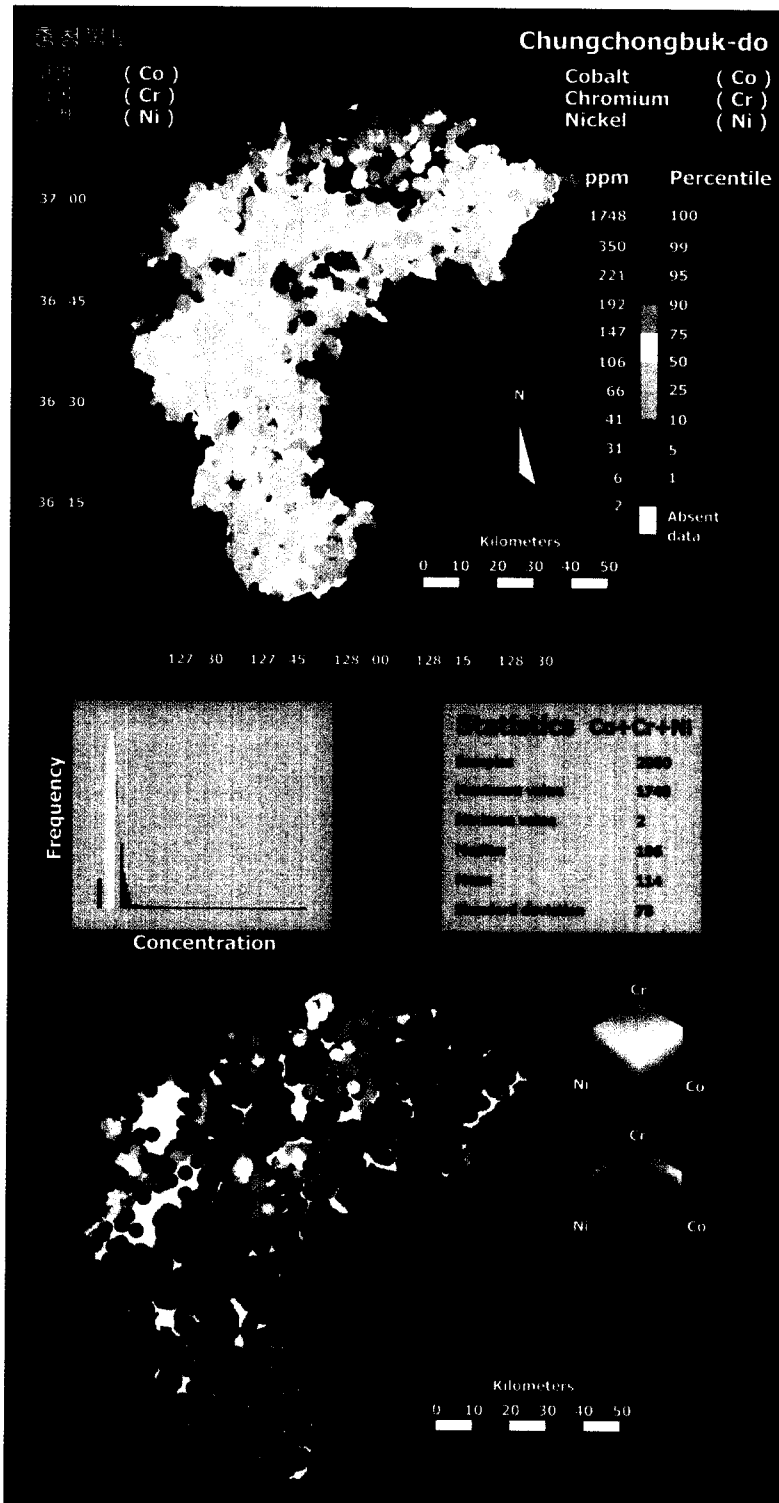


Fig. 4. Composite geochemical map for chromium, nickel and cobalt in stream sediment, Chungchongbuk-do. Upper: based on total concentrations, Lower: by combining the scaled monochrome, red, green and blue geochemical images.

7. 맺는 말

자연재해방재기술개발사업단에서 지질재해 분야 가운데 지구화학적 재해 분야의 대응기술과제로 수행중인 전국 지구화학적 재해 평가기준도 작성 사업에서는 현재 경기-수도권, 충북, 충남, 전북, 전남 등 5개 권역에 대한 연구결과를 마무리 단계에 있다. 이 사업을 통해 취득된 모든 정보는 다양한 형태로 제작하여 보급할 예정이다. 주요 성과물의 종류는 그동안 4년간의 연구수행 내용은 종합보고서로 발간하고, 원소별 전산 지화학도는 A3 규격의 칼라도면으로 별책으로 작성하여 설명서와 함께 발간할 예정이다. 책자로 표현하기 어려운 다양한 전산 이미지와 정보는 CD-R로 제작하여 정부 관계부처와 지방자치단체(도, 군), 기타 산·학·연 관련기관에 보급할 계획이다.

아울러, 현재 보완중인 web 검색망의 내용을 대폭 증강하여 누구나 손쉽게 자료를 검색할 수 있게 할 예정이다. 특히 web에는 보고서에 포함되기 어려운 방대한 양의 전산 지질자료와 지형정보 등이 수록되어 효율적인 정보검색을 도울 것이다.

향후 계획은 경상남도, 경상북도, 강원도에 대한 연차적인 사업을 수행하여, 전국도에 대한 지구화학적 재해 평가체계를 완전하게 구축할 예정이다.

사 사 : 이 연구는 과학기술부에서 시행하는 중점국가연구개발사업의 하나인 자연재해방재 기술개발사업으로 수행되었다. 이 사업이 원만하게 추진될 수 있도록 지원해 준 과학기술부 관계관들에게 감사 드린다. 야외탐사에 공동참여한 한국자원연구소와 각 권역에 소재한 여러 대학교의 탐사팀, 그리고 방대한 분석과 품질관리에 노력한 한국자원연구소 분석팀들에게 감사드린다.

참고문헌

- 오창환, 서민호, 신성천, 이명우, 정성석, 2000, 오염지역 퇴적물의 자연적 지화학 기준치 설정을 위한 기초연구: 2000년도 춘계공동학술발표회 논문집, 한국자원공학회, 대한자원환경지질학회, 한국지구물리탐사학회, 조선대학교, 2000년 4월 14일-15일, p. 86-87.
- 이현구, 조애란, 이찬희, 1999, 입도분포에 따른 하상퇴적물의 지구화학적 분산 및 부화: 대한자원환경지질학회지, 32권, 3호, p. 47-260.
- 임연풍, 1996, 의학환경 지구화학: 한국학술진흥재단 번역총서, 도서출판 춘광, pp. 434.
- 장호완, 염병우, 박노영, 1987, 고남산 함티탄자철광상의 모암인 알칼리 반려암질암의 암석화학적 연구: 광산지질, 20권, p. 85-95.
- 진명식, 신성천, 지세정, 홍영국, 김원영, 1998, 경기-수도권 지역의 환경지화학도: 제 53차 대한지질학회 학술발표회, 부산대학교, 1998년 11월 5일-7일, p. 39.
- Darnley, A.G. et al.(eds.), 1995, A Global Geochemical Database for Environmental and Resource Management - Recommendations for International Geochemical Mapping: Final Report of IGCP Project 259, Earth Sciences 19, UNESCO Publishing, 122 pp.
- Koljonen, T.(ed.), 1992, Geochemical Atlas of Finland, Part 2: Till: Geological Survey of Finland, Espoo, Finland, 218 pp.
- Lide, D.R.(editor-in-chief), 1996, CRC Handbook of Chemistry and Physics: 77th edition, 1996-1997, CRC Press, Boca Raton, USA.
- Plant, J.A., Breward, N., Forrest, M.D. and Smith, R.T., 1989, The gold pathfinder elements As, Sb and Bi: their distribution and significance in the southwest

Highlands of Scotland: Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section B, Applied Earth Science, v. 98, B91-101.

Shin, S.C., Jin, M.S., Hong, Y.K., Park, S.W. and Lee, P.K., 1999, National geochemical mapping programme in Korea: 2nd Asia-Pacific Symposium on Environmental Geochemistry, Seoul National University, November 2-4, Seoul, Korea.

Reimann, C. and Caritat, P. de, 1998, Chemical Elements in the Environment: Springer-Verlag, pp. 398.

Taylor, S.R. and McLennan, S.M., 1995, The geochemical evolution of the continental crust: Reviews of Geophysics, v. 33, p. 241-265.

Wedepohl, K.H.(ed.), 1978, Handbook of Geochemistry: Berlin-Heidelberg, Springer-Verlag.