

## 회귀 수식을 이용한 지구화학적 이상분포지역 도출 기법: 경기도 화강암의 예

황상기<sup>1\*</sup> · 신성천<sup>2</sup> · 염승준<sup>3</sup> · 문상원<sup>4</sup>

<sup>1</sup>배재대학교 토목환경공학과, <sup>2</sup>한국지질자원연구원, <sup>3</sup>고려대학교 지구환경과학과, <sup>4</sup>(주)일신하이텍

### The Methodology for Extraction of Geochemical Anomalies, Using Regression Formula: an Example from a Granitic Body in Gyeonggi Province

Sang-Gi Hwang<sup>1</sup>, Seong-Cheon Shin<sup>2</sup>, Seung-Jun Youm<sup>3</sup> and Sang-Won Moon<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Geotechnical Engineering Department, Paichai University

<sup>2</sup>Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

<sup>3</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, Korea University

<sup>4</sup>Ilshin Hitec Co., Ltd.

Natural geological and environmental processes reflect to element abundances in geological materials on the surface. This study aims to elucidate a possibility of geostatistical application to differentiate geochemical anomalies affected by anthropogenic and geogenic factors. A regional geochemical map was produced using 'inverse distance weight interpolation' method for analytical results of stream sediments (<150  $\mu\text{m}$ ) which were collected from 2,290 first- to second-order streams over the whole Gyeonggi Province. The Jurassic granitic batholith in the southeastern province was selected as a target for the geostatistical examination. Factor analysis was conducted using 22 elements for stream sediments from 445 drainage basins over the granitic body. Co, Cr, Sc, MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, V, and Ni were grouped with high correlation coefficients and the depletion of the components may reflect the whole-rock chemistry of the granite. Regression analysis was done using Co, Cr, and Sc as dependent variables and other six components as independent variables, and the results were drawn as maps. The maps acquired generally show quite similar distribution patterns with those of concentrations of each variable. The similarity in the spatial patterns between the two maps indicates that the application of regression statistics can be valid for the interpretation of regional geochemical data. However, some components show local discrepancies which may be influenced by secondary factors regardless of the basement lithology. The regression analysis may be effective in extracting local geochemical anomalies which may reflect rather anthropogenic pollutions than geogenic influences.

**Key words :** geochemical map, stream sediments, granite, regression analysis, geochemical anomaly

자연에서 일어나는 지질작용과 환경변화는 지표 지질물질 내 원소의 존재량에 큰 영향을 미친다. 이 연구에서는 지구화학적 이상현상이 지질기원인지 인위적 요인에 의한 것인지를 판별해 내는 데에 지구통계 기법을 적용할 수 있는지를 검증하였다. 경기도 전역의 2,290개 1-2차 수계에서 채취한 하천퇴적물(표사, <150  $\mu\text{m}$ )의 분석결과를 바탕으로, 역거리 가중 보간법으로 광역 지구화학 지도를 작성하였다. 지구통계 기법을 검증하기 위해 경기도 남동부에 저반상으로 분포하는 주라기 화강암체를 표본지역으로 선정하여, 445개 집수분지를 대표하는 하천퇴적물 시료의 22가지 원소에 대해 요인분석을 하였다. Co, Cr, Sc, MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, V, Ni 등이 서로 상관도가 높은 그룹으로 구분되며, 이들의 낮은 함량은 화강암의 전암 조성에서의 결핍 특성을 잘 반영한다. Co, Cr, Sc을 각각 종속변수로, 이들 외 다른 6가지 성분을 독립변수로 설정하여 회귀분석을 실시하여, 회귀식으로 계산된 값을 바탕으로 분포도를 작성하였다. 회귀식으로 만든 분포도는 각 변수의 본래 분석치로 나타낸 분포도와 매우 유사한 패턴을 보인다. 이와 같이 두 가지 분포도가 유사한 것은 회귀분석에 의한 통계기법이 광역적인 지구화학 자료를 해석하는 데에 타당성을 가짐을 말해 준다. 그러나, 일부 성분에서 두 가지 분포도에서 이상대 영역이 서로 일치하지 않는 경우도 있는데, 이는 기반암의 화학조성과는 무관한 이차 요인에 기인할 가능성이 크다. 결론적으로, 회귀분석에 의한 지구통계기법을 적용하여, 국지적인 지구화학적 이상현상이 지질기원이 아닌 인위적인 영향에 기인한 것인지를 효과적으로 판별해 낼 수 있는 것으로 검증되었다.

**주요어 :** 지구화학 지도, 하천퇴적물, 화강암, 회귀분석, 지구화학 이상대

\*Corresponding author: sghmap@mail.paichai.ac.kr

## 1. 연구배경 및 목적

일반적으로 지표환경에서 원소의 존재량과 분포상태를 광역적으로 파악하기 위해서 목적에 가장 적합한 지질매체를 대표시료로 채취하여 분석자료를 바탕으로 원소별 함량 분포도인 지구화학 지도(geochemical map)를 우선적으로 작성한다. 지구화학 지도는 원소의 광역적인 분포패턴을 한 눈에 볼 수 있어, 지구화학 이상대(異常帶, anomaly)를 쉽게 도출해 내는 데에 매우 효과적으로 활용된다. 아울러, 다양한 지질단위별로 본래 갖는 자연배경치(natural background)의 설정은 물론, 인위적 요인에 의한 특정 성분의 이차 오염을 평가하는 데에도 정량·정성적인 기준치(baseline)를 제시해 주게 된다.

전국 규모로 작성중인 지구화학 지도는 국토 전역의 지표환경에서 유해원소가 과다하게 농집된 지역을 도출하여 폐광산으로부터의 중금속 확산이 심한 지역이나 새로운 유용광물자원의 부존 가능 지역을 제시하거나, 인위적 오염 등에 기인한 이차 부화현상을 감지하는 데에 효과적으로 이용되며, 반면에 필수 원소의 함량이 지나치게 낮은 지역을 도출해 내어 영양분의 결핍현상 발생에 따른 대응방안을 제시하는 등 자연환경의 평가와 자원관리의 여러 목적에 활용할 수 있다.

전세계적으로 지표환경에서의 원소의 존재량과 분포 상태를 가장 효율적으로 나타내 주는 지구화학 지도는 1-2차 수계의 하천퇴적물(stream sediment)을 대표시료로 하여 작성한다(Darnley *et al.*, 1995; 신성천 외, 2000). 광역적으로 작성된 지구화학 지도에서 정상적인 값에서 매우 벗어나는 이상현상의 원인이 본래 기반암의 성분에 기인한 것인지, 아니면 이차 요인에 의한 영향인지를 구분한다는 것은 일일이 현장정보를 검토하지 않고서는 결코 쉬운 일이 아니다. 따라서, 기반암의 화학조성과 하천퇴적물의 성분은 밀접한 관련이 있으므로, 전국 규모로 취득한 하천퇴적물의 광역적인 분석자료와 기반암의 분포를 비교하여, 정상적인 지구화학적 분포에서 크게 벗어나는 이상치(異常值)를 추출해 낼 수 있는 지구통계 기법을 제시하고, 추출된 이상치에 대하여 지구통계학적인 원인분석을 실시함으로써, 이들 이상대가 자연적인 지질기원에 의한 것인지, 이차적인 영향을 반영하는 것인지를 구분하는 데에 있어서의 활용성을 검증하고자 한다.

이를 위하여 경기도 남동부에 넓게 분포하는 주라기

화강암 분포지역을 예로 들어, 하천퇴적물의 분석 자료에 대한 요인분석을 통하여 화강암의 지구화학적 조성과 밀접하게 관련된 원소를 도출하고, 그 원소를 대상으로 기반암과의 통계적 관계를 설정하기 위하여 회귀분석을 수행하였다.

국내 지구과학 분야에서 회귀분석은 특정 주제에 관한 원소 함량의 변화패턴을 정량적으로 정의하고, 정량적 수식이 갖는 의미를 해석하는 데에 주로 활용되었다. 정량적으로 적용한 몇 가지 예를 들면, 광화작용과 관련된 모암의 변질작용 유형의 추정(황인호와 전효택, 1994), 광산주변의 중금속원소 분산관계의 정량적 정의(박천영 외, 1998), 강수의 안정동위원소 조성의 수식 정립(이광식과 정재일, 1997), 지하수 수위와 지형 표고와의 관계 분석(심병완 외, 2000) 등을 들 수 있다. 그러나, 정량적 수식에 의해 계산된 자료의 공간적인 분포를 함께 해석한 사례는 전혀 없다. 따라서, 이 연구에서는 회귀식에 의해 계산된 자료와 원래 분석치를 공간적으로 비교하는 기법을 제시하고, 이 기법에 의해 비교된 광역적인 지구화학적 자료를 활용하여 공간적인 이상대를 효과적으로 도출하는 사례를 제시하고자 한다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 시료 채취

지구화학 지도 작성을 위한 대표시료로 채취하는 지질매체는 형태와 특성에 따라, 그들이 반영하는 대표성과 의미가 서로 다르므로, 목적에 따라 다양한 매체가 이용되고 있다. 이 논문에서 다루는 지구화학 분석 자료는 한국지질자원연구원 주관으로 전국 규모의 다목적 광역 지구화학 지도 작성사업(신성천 외, 2000)의 일환으로 '경기도 지구화학 지도'(신성천 외, 2001)의 작성을 위해 채취한 하천퇴적물의 분석치를 바탕으로 하였다. 대표시료는 '국제 지구화학 지도 작성 프로그램'에서 제안한 표준안(UNESCO 보고서, Darnley *et al.*, 1995)을 준수하여 발원지에 가까운 1-2차 수계의 물이 흐르는 하천(active channel)의 바닥에 퇴적된 미세한 크기(150  $\mu\text{m}$  이하, -100 mesh 해당)의 가벼운 표사(漂砂)이다. 표사는 채취지점 상류의 집수분지(集水盆地, drainage basin) 내의 지표에 노출된 암석이 풍화되어 이동된 수많은 입자들이 하천수에 의해 운반된 것으로서, 집수분지 내에 분포하는 모든 지질을 축약시켜 놓은 것이나 다름없다는 점에서 대표성이 가장 뛰어나다.

## 2.2. 분석 방법

하천퇴적물 시료는 한국지질자원연구원에서 일관되게 분석하였으며, 채취한 입자(<150  $\mu\text{m}$ )를 완전히 건조시켜 잘 연마하여 대부분 53  $\mu\text{m}$ (270 mesh)보다 미세한 분말로 만들어 분석하였다. 이 통계기법 연구에 이용된 분석자료는 총 22가지 성분이다. 규소( $\text{SiO}_2$ ), 칼슘( $\text{CaO}$ ), 마그네슘( $\text{MgO}$ ), 철( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), 칼륨( $\text{K}_2\text{O}$ ), 망간( $\text{MnO}$ ), 티탄( $\text{TiO}_2$ ) 등 7가지 주구성 성분은 엑스선 형광 분광법(X-Ray Fluorescence Spectrometry: XRF)으로, 그리고 미량원소 가운데 바륨(Ba), 베릴륨(Be), 구리(Cu), 납(Pb), 리튬(Li), 니켈(Ni), 스트론튬(Sr), 바나듐(V), 지르코늄(Zr) 등 9가지 원소는 유도결합 플라즈마 원자방출 분광법(Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry: ICP-AES), 코발트(Co), 크롬(Cr), 스칸듐(Sc), 안티몬(Sb), 루비듐(Rb), 아연(Zn) 등 6가지 원소는 중성자 방사화 분석법(Neutron Activation Analysis: NAA)에 의하여 정량하였다. 분석결과는 표준시료, 공시료, 중복시료를 이용하여 체계적인 정도 관리를 실시하였으며, 별도로 한 장소에서의 중복 채취와 같은 시료에 대한 반복분석을 병행하여 분석치 품질관리를 철저히 하였다. 18개월의 분석시차를 두고 반복 분석을 실시한 결과, 분석시차에 따른 실험조건 변화나 시료의 균질성 등 내부적인 요인에 기인하는 분석편차는 매우 작고 신뢰도는 높은 것으로 입증되었다. 예를 들어, 회귀분석에 이용된 Co, Cr, Sc의 변화량은 2.6~3.3% 간이다.

## 2.3. 연구대상 암체

경기도에는 주로 선캄브리아기의 변성암류와 중생대 쥐라기의 화강암류가 지표에 넓게 노출되어 있다. 그 밖에 비교적 작은 규모로 쥐라기 퇴적암, 백악기 화산암류와 화강암, 백악기 퇴적암, 신생대 제사기 화산암 등이 비교적 제한된 지역에 분포한다. 이 가운데, 경기도 남동부의 양평군 남동부-여주군-이천시-안성시 일대에 동북-남서방향으로 거대한 저반(底盤, batholith)으로 넓게 분포하는 쥐라기 화강암체 분포지역(Fig. 1의 빗금친 부분)에 해당되는 분석자료를 선별하여 지구통계 분석을 실시하였다. 화강암을 연구 대상으로 선택한 이유는, 퇴적암 또는 변성암에 비해 단일 화강암체 내에서 화학조성의 변화가 심하지 않고, 지구화학적으로 균질성이 비교적 좋기 때문이다. 연구대상으로 선정된 화강암체는 주로 각섬석-흑운모 화강암과 흑운모-화강암으로 구성되며, 지역적으로 복운모 화강암까지 진화된 부분도 있다. 암체의 조성은 '화강암'과 '화강섬록암'

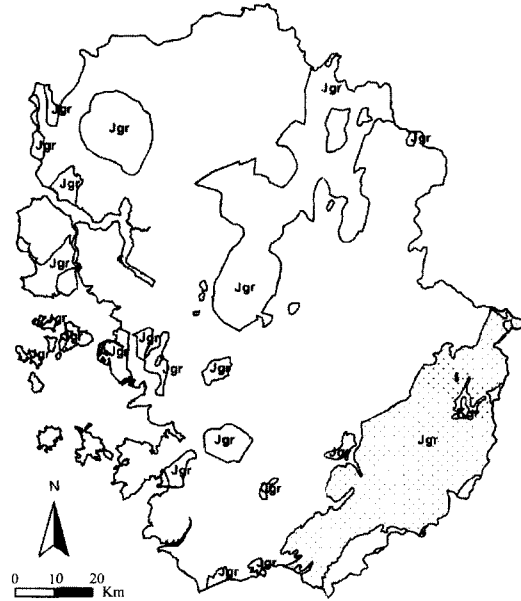


Fig. 1. Granite exposures in Gyeonggi Province. Shaded area: target granite for the geostatistical analysis, Jgr: Jurassic granite, Kgr: Cretaceous granite, Blank: Precambrian gneiss-schist.

영역에 속한다. 동위원소 연대자료(Jin *et al.*, 1984)에 의하면, 약 2억년 전후의 쥐라기에 관입·정착한 것으로 해석된다.

## 3. 광역 지구화학 자료의 보간

2차원 공간에서 점이적으로 변화하는 자료를 분석할 때에는 크리깅(Kriging) 보간법(補間法, interpolation)이 흔히 사용된다. 이 방법은 추정위치의 자료값을 구할 때 주변의 자료가 구하고자 하는 자료 위치에 어느 정도 영향을 미치는가를 통계적으로 계산하여 주변자료에 가중치를 결정하는 방법으로서, Surfer 또는 GIS 같은 상용 소프트웨어로 제공되므로 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 자료의 양이 방대하고 처리영역이 넓은 경우에는 일률적인 가중치 계산이 어렵고, 일반 상용 소프트웨어는 자료의 분포영역 내에서만 추정 값을 계산하지 않고 배리오그램(variogram)으로 분석된 가중치를 사각형 영역으로 설정하도록 되어 있어, 도(道) 경계부나 지질경계부가 곡선인 경우에는 크리깅 모델을 적용하기는 적합하지 않다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 크리깅의 자료모델을 작은 지역으로 세분한 후, 지역을 일정 간격으로 이동하면서 이동 지역을 대상으로 모델화하고 이를 가중치 계산에 활용하고, 분

포된 자료의 가장자리 경계부와 자료가 없는 지역에서는 보간계산을 하지 않도록 하기 위하여, 이동 창(moving window) 방법을 적용하였다.

이 연구에서는 이동창의 중심부가 추정치의 위치가 되도록 설정하고, 반경이 일정한 이동창의 내부에 자료가 5개 이하인 경우는 추정치 계산을 하지 않도록 하였으며, 6개 이상의 자료가 분포할 때만 그 자료를 보간하여 계산결과를 추정치로 기록하도록 하는 프로그램을 작성하여 사용하였다. 이동 창을 변의 길이와 이동 창의 간격을 다양하게 주어 이동시키면서 크리깅 보간을 비교한 결과, 이동 창을 크게 하면 자료의 개수가 많아져 계산의 정확도가 높아지나 계산의 속도가 급격히 떨어져 주어진 자료를 모두 분석하는데 효율적이지 못하였다. 이동간격이 좁을수록 자료의 분포변화는 점이적인 형태를 보이며 자료가 분포하지 않은 지역을 찾는 데에는 효과적이었으나 계산 속도가 현실적이지 못하였다. 한편, 이동간격이 넓으면 계산 속도는 빨라지나 자료분포를 점이적으로 표현하지 못하고 자료의 경계부에서 정확한 계산을 수행하지 못하는 단점이 있었다.

결론적으로, 경기도 전역의 광역 지구화학 지도 작성에 가장 효율적인 조건은, 채취된 시료의 분포밀도(간격)를 근거로 하여 이동 창의 형태와 크기는 반경 2 km의 원(圓)으로 하고 창의 이동거리(추정점의 간격)는 250 m로 하는 것이 가장 효율적이라는 결론을 얻었다.

크리깅 보간법에서 가장 큰 문제는 이동 창이 설정될 때마다 연립방정식의 해법을 구하는 수식을 계산해야 하므로 컴퓨터 처리에 많은 시간이 소요되어, 예를 들어 경기도 전역에 대한 방대한 양의 자료를 처리하기에는 부적합하므로, 상대적으로 계산량이 적은 역거리 가중(逆距離 加重, inverse distance weight) 보간법을 적용하였다. 역거리 가중 보간법은 이동 창을 일정 간격으로 이동하면서 추정 값을 구하는 것은 크리깅 보간법과 마찬가지로이지만, 추정치의 계산을 추정위치와 주어진 값들의 위치 간의 거리에 비례하여 가중치를 계산하는 점이 다르다. 이와 같이 단순 거리관계에 의한 가중치 계산을 수행하면 크리깅에서 연립방정식 해법에 관한 수식을 계산하는 것보다, 훨씬 계산시간을 줄일 수 있다. 한편 크리깅과 역거리 가중법에 의한 추정치 분포도를 비교한 결과, 최종 작성도면은 다소 차이가 있으나 전체적인 분포를 나타내는 데에는 두 방법 사이에 큰 차이를 보이지 않는다. 자료의 특성상 상용 소프트웨어를 사용하지 못하고 Visual Basic을 이용하여 지구화학 자료의 보간을 위한 코드를 제

작하였다.

#### 4. 지구통계 분석 결과

이 연구를 위해 경기도 전역의 총 2,290개의 1-2차 수계에서 채취한 하천퇴적물 내의 22가지 원소에 대한 분석자료가 이용되었으며, 이들 자료를 이용하여 보간된 자료의 수는 총 133,887개이다. 경기도 전역에 대한 평균 시료채취간격(밀도)은 약 3.5 km<sup>2</sup> 당 1개 정도이다. 연구대상 화강암 지역에서 채취한 하천퇴적물 시료의 수는 445개이며, 보간된 자료, 즉 통계계산에 활용된 자료의 수는 21,553개이다.

지구화학 자료의 통계 분석은 다음과 같은 절차에 의하여 수행되었다. 우선, 연구대상 화강암의 일차 조성과 연관된 원소를 추출하기 위하여 요인분석(factor analysis)을 수행한 다음, 요인분석에 의해 연관성이 입증된 자료에 대해서는 통계적 관련성을 조사하기 위하여 선형 회귀분석(linear regression analysis)을 수행함으로써 특정 원소들의 선형 회귀식을 정립하였다. 그 다음에는 이 수식에 의해 새롭게 계산된 원소의 함량을 실제 분석치와 비교하였다. 효율적인 통계분석을 위하여 조사자료의 공간적인 분포를 보간하여 250 m × 250 m 크기의 등간격 화소(pixel)에 할당하였으며, 각 화소에 할당된 분석치를 도면화하였고, 이들을 중첩하여 통계분석을 수행하였다.

##### 4.1. 요인분석

요인분석은 연속적인 숫자로 정의된 다양한 변수(자료군)의 상호관계에서 유사한 자료변화를 갖는 변수의 군집을 분류하는 데에 활용되는 통계기법이다. 즉 변수간의 상관행렬을 계산하고 누락치를 분석하여 누락치 검사를 통해 요인모형을 결정하고 요인을 추출하는 과정을 통계적으로 수행하는 것이다. 그러므로 다양한 변수를 동질성을 갖는 몇 개의 공동집단으로 묶어줄 수 있는 강력한 통계기법이다. 이 연구의 지구화학 자료는 22가지 원소(성분)가 변수로 정의된 다양한 자료 집단으로서, 이들을 연관성이 있는 것끼리 몇 개의 집단으로 분류하기 위해서는 요인분석이 적절한 도구로 활용될 수 있다. 이번 연구에서는 R-모드의 요인방법과 주성분 분석법(principal component analysis)을 모델로 채택하였으며, 상용 소프트웨어인 'SPSSWIN'을 활용하였다.

요인분석의 결과는 Table 1에 정리되어 있다. 연구대상인 양평군·여주군·이천시 일대의 주라기 화강암 분

Table 1. Results of the factor analysis.

	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6	Factor 7
Co	0.937	-0.020	0.000	0.080	-0.010	0.154	-0.040
MgO	0.924	0.124	0.203	0.020	-0.050	0.000	0.020
Sc	0.916	-0.010	0.030	0.060	-0.010	0.060	0.070
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.869	-0.020	0.050	0.347	-0.188	-0.040	0.000
Cr	0.812	0.295	0.000	-0.020	-0.153	-0.020	-0.000
V	0.781	0.395	0.129	0.247	-0.040	-0.163	0.030
Ni	0.762	0.505	-0.106	0.000	0.090	-0.060	0.000
Be	0.670	-0.289	0.010	0.422	0.156	0.000	-0.108
K <sub>2</sub> O	-0.636	0.157	-0.202	-0.110	0.503	-0.060	-0.080
Cu	0.361	0.791	0.080	0.090	0.187	0.090	0.000
Li	0.020	-0.734	-0.000	0.216	0.224	0.040	-0.198
Sr	-0.167	0.030	0.915	-0.030	0.070	-0.010	-0.111
CaO	0.508	-0.070	0.700	0.010	-0.060	0.040	0.070
SiO <sub>2</sub>	-0.326	-0.010	-0.136	-0.686	0.040	-0.156	-0.040
MnO	0.169	-0.060	-0.151	0.590	-0.350	0.176	-0.040
Zr	-0.060	-0.255	-0.040	0.507	0.347	-0.343	0.060
Pb	-0.155	0.434	-0.293	0.487	0.090	-0.159	-0.433
TiO <sub>2</sub>	0.198	0.050	0.439	0.447	0.070	0.000	0.222
Ba	0.010	-0.010	0.127	-0.040	0.833	0.040	-0.040
Rb	-0.254	-0.108	-0.477	0.050	0.568	0.111	0.203
Zn	-0.000	-0.020	-0.000	0.118	0.060	0.936	0.040
Sb	-0.000	0.150	-0.060	0.060	0.020	0.010	0.870

Method: Principal Component Analysis; Varimax rotation with Kaiser normalization

포지역에서 채취한 하천퇴적물 시료의 화학조성을 요인분석한 결과, 코발트(Co), 마그네슘(MgO), 철(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 크롬(Cr), 바나듐(V), 니켈(Ni), 스칸듐(Sc) 등 7가지 성분이 첫 번째 요인으로 강하게 그룹화 되었다(Table 1). 하천퇴적물 내 이들의 존재량은 연구지역에 노출된 화강암의 풍화작용에 의한 고유 성분이 주로 반영된 것으로 해석할 수 있다. 즉, 주구성 성분인 MgO와 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 미량원소인 Co, Cr, V, Ni, Sc 등은 서로 높은 상관관계를 가지고 함량변화를 보이는 것으로 확인되었다. 이들 원소들은 서로 상관관계는 좋으나, 모두 매우 낮은 함량을 보이는 특징이 있는데, 그 이유는 이들 성분은 초기 마그마작용 중에 부화되는 특성을 가지므로 연구대상 암체처럼 비교적 진화된 화강암에는 결핍되기 때문으로 해석된다. 대조적으로, 연구대상 화강암체의 북쪽에 분포하는 선캠브리아기의 변성암류의 일부 지역과 양평군 일대에 국지적으로 분포하는 트라이아스기 염기성 화성암 복합체(섬록암-반려암) 지역에서는 마그마작용 초기 단계에 각섬석과 휘석을 위시한 철·마그네슘 규산염 광물 또는 철-티탄-크롬 산화물 등의 높은 존재량에 기인하여 높은 함량을 보인다(신성천 외, 2001).

## 4.2. 회귀분석

회귀분석은 여러 개의 독립변수가 하나의 종속변수와 어떠한 관계를 갖는가를 검증하기 위해 사용되는 통계방법이다. 즉, 예측되는 회귀모형을 설정하고, 모형에 의해 최적의 회귀식을 도출해 내는 방법이다. 이 연구에서는 선형의 회귀모형을 사용하였는데, 이는 다음과 같은 기본 회귀식을 도출하는 통계기법이다. 이 연구에서는 유의수준 5%에서 회귀식이 선형관계를 갖는 조건으로 자료분석을 수행하였다.

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + B_4X_4 + \dots + B_nX_n$$

Y : 예측된 종속변수의 값

B<sub>0</sub> : 모든 독립변수가 0일 때 Y값의 상수

B<sub>1</sub> : 회귀계수

X<sub>1</sub> : 독립변수의 값

요인분석에서 확인된 7개의 성분 가운데, 원소의 분포도가 지질분포와 가장 유사한 특성을 보이는 미량원소인 Co, Cr, Sc에 대해 회귀분석을 수행하였다. 회귀분석에서는 Co, Cr, Sc을 각각 종속변수로 설정하고, 종속변수로 설정된 원소 외의 나머지 6가지 원소들을

**Table 2.** Results of linear regression analysis.

Variables		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95% Confidence Interval for B		Correlations		Collinearity Statistics		
Dependent	Independent	B	Standard Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound	Zero-order	Partial	Part	Tolerance	VIF
Co	Constant	-1.511	0.046		-33.127	0.000	-1.600	-1.421					
	MgO	0.842	0.057	0.117	14.678	0.000	0.730	0.955	0.851	0.099	0.041	0.124	8.039
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.866	0.017	0.317	49.989	0.000	0.832	0.900	0.835	0.322	0.140	0.195	5.124
	Cr	0.021	0.001	0.171	29.221	0.000	0.019	0.022	0.760	0.195	0.082	0.229	4.366
	V	-0.022	0.001	-0.121	-20.207	0.000	-0.024	-0.020	0.713	-0.136	-0.057	0.218	4.585
	Ni	0.042	0.002	0.089	17.055	0.000	0.037	0.047	0.668	0.115	0.048	0.286	3.502
	Sc	0.464	0.007	0.420	67.999	0.000	0.451	0.478	0.867	0.420	0.190	0.206	4.860
Cr	Constant	-0.244	0.444		-0.550	0.582	-1.115	0.626					
	Co	1.855	0.063	0.223	29.221	0.000	1.730	1.979	0.760	0.195	0.093	0.176	5.692
	MgO	43.871	0.459	0.730	95.545	0.000	42.971	44.771	0.850	0.546	0.306	0.175	5.703
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.530	0.173	0.111	14.626	0.000	2.191	2.869	0.698	0.099	0.047	0.177	5.662
	V	-0.177	0.010	-0.116	-16.931	0.000	-0.197	-0.156	0.681	-0.115	-0.054	0.217	4.610
	Ni	1.154	0.022	0.296	52.109	0.000	1.111	1.197	0.742	0.335	0.167	0.317	3.152
	Sc	-3.092	0.068	-0.336	-45.250	0.000	-3.226	-2.958	0.678	-0.295	-0.145	0.186	5.391
Sc	Constant	0.720	0.042		17.133	0.000	0.638	0.802					
	Co	0.380	0.006	0.421	67.999	0.000	0.369	0.391	0.867	0.420	0.191	0.205	4.872
	MgO	3.241	0.047	0.496	68.525	0.000	3.148	3.333	0.854	0.423	0.192	0.150	6.667
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.556	0.016	0.225	34.494	0.000	0.525	0.588	0.827	0.229	0.097	0.185	5.419
	Cr	-0.028	0.001	-0.258	-45.250	0.000	-0.029	-0.027	0.678	-0.295	-0.127	0.241	4.145
	V	-0.003	0.001	-0.015	-2.532	0.011	-0.005	-0.001	0.724	-0.017	-0.007	0.214	4.670
	Ni	0.028	0.002	0.065	12.415	0.000	0.023	0.032	0.642	0.084	0.035	0.284	3.524

독립변수로 설정하여 실시하였다. 회귀분석의 결과는 Table 2에 요약되어 있다. Table 2에서 정리된 바와 같이 종속변수로 설정된 각 원소의 함량에 대한 회귀식은 아래와 같다( $p < 0.05$ ).

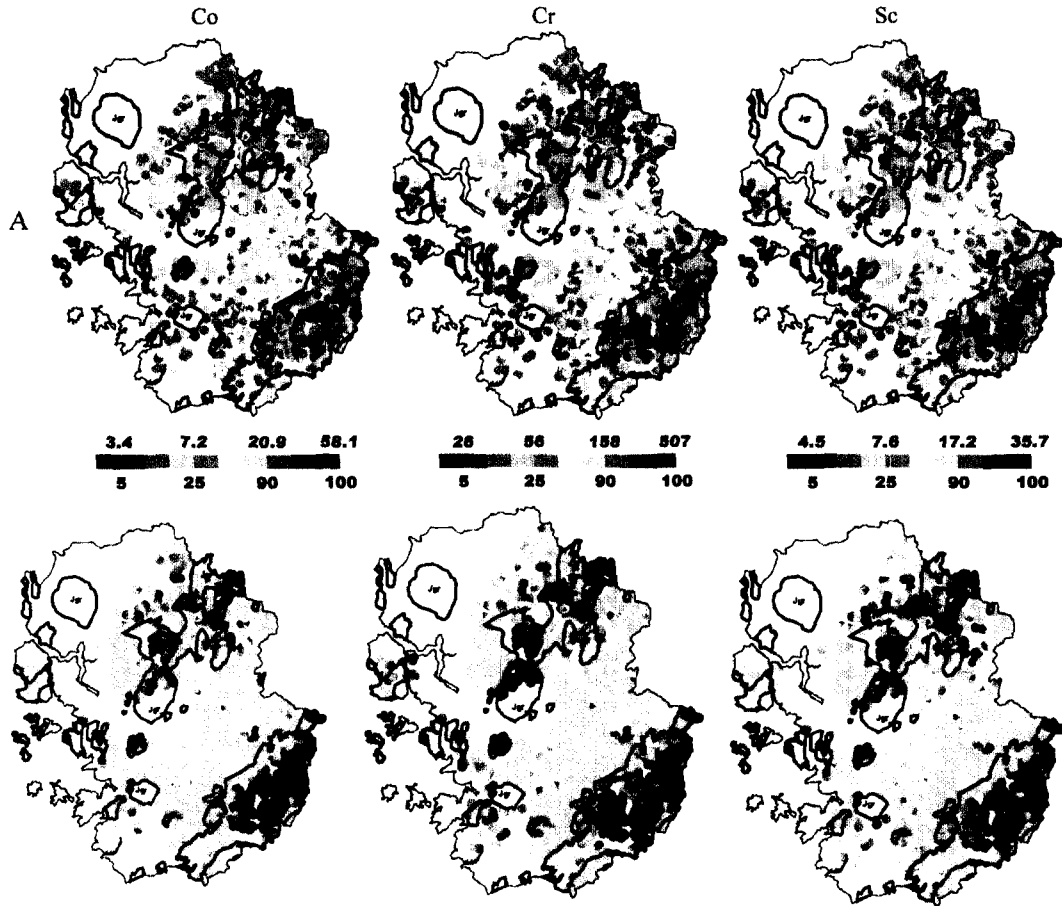
$$\begin{aligned} \text{Co} &= -1.511 + 0.842 \text{ MgO} + 0.866\text{Fe}_2\text{O}_3 + 0.02055\text{Cr} \\ &\quad - 0.02218\text{V} + 0.04191\text{Ni} + 0.464\text{Sc} \\ \text{Cr} &= -0.244 + 1.855\text{Co} + 43.871\text{MgO} + 2.53\text{Fe}_2\text{O}_3 \\ &\quad - 0.177\text{V} + 1.154\text{Ni} - 3.092\text{Sc} \\ \text{Sc} &= 0.72 + 0.38\text{Co} + 3.241\text{MgO} + 0.556\text{Fe}_2\text{O}_3 \\ &\quad - 0.02806\text{Cr} - 0.00254\text{V} + 0.0277\text{Ni} \end{aligned}$$

여기서, 함량 단위는 주구성 성분인 MgO와 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 중량백분율(wt.%)이며, 미량원소인 Co, Cr, Sc, Ni, V의 함량 단위는 mg/kg(ppm)이다. 위의 회귀식을 이용하여 경기도 전역의 하천퇴적물 중 Co, Cr, Sc에 대한 추정농도값을 계산하여 그 결과를 도면화 하였다(Fig. 2B). 즉, 경기도 전역을 250 m×250 m 크기로 등분한 화소에서 7가지 원소값을 읽은 후 회귀식을 이용하여 독립변수에 해당되는 원소의 값으로부터 종속변수의 값을 계산한 후 그 계산치를 이용하여 도면을 제작하였다.

## 5. 토 의

이 연구에서 지구화학적 자료의 공간적인 분포에 관한 통계분석은 다음 3가지 전제조건을 바탕으로 시도하였다. ①첫째, 하천퇴적물은 기반암의 풍화산물로서, 분석된 시료는 시료채취지점 상류 집수분지의 지표에 노출된 지질의 성분을 대표적으로 가장 잘 반영한다. ②둘째, 동일한 화강암체 분포지역 내에서의 원소의 함량변화는 화강암 자체의 분화과정 등 지구화학적 특성에 의한 변화를 반영할 것이며, 이러한 경향은 통계적으로 확인될 수 있다. 즉, 단일 암체에서 그룹 지어진 원소의 함량 변화는 통계적으로 일정한 패턴을 보일 것이다. ③셋째, 통계적인 변화 패턴에서 벗어나는 특이한 이상치 자료의 그룹은 지질기원이 아닌 인위적 영향 등 이차 요인에 기인할 가능성이 크다고 볼 수 있다.

일반적으로 화강암 지역에서 채취한 하천퇴적물에 대한 분석결과는 대부분의 미량원소와 주구성 원소의 경우에 기존에 발표된 화강암 자체의 전암(全岩) 분석치와 정확하게 일치하지는 않으나, 대체로 유사한 경



**Fig. 2.** Regional geochemical maps for Co, Cr, and Sc concentrations in stream sediments from the Gyeonggi Province. A: Maps drawn from analytical concentrations (in ppm). B: Maps drawn based on the concentrations calculated using linear regression formulas (See the text for detailed explanation).

향이 있다. 예를 들어, 국내 심성암의 전암 분석치에 대한 요인분석 결과(이태섭 외, 1996)에서 Co와 Sc은 V, SiO<sub>2</sub>, Rb, Zn, Li, Th, Zn 등과 함께 첫 번째 요인으로 그룹화되며, SiO<sub>2</sub> 함량과 음의 상관관계를 보여준다. 백악기 화강암에서도 Co와 Sc은 TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, CaO, MgO, FeO, V 등과 함께 SiO<sub>2</sub>와 음의 상관관계를 갖는 것으로 알려져 있다(김규한, 1992).

이 연구에서 표본지역으로 선정한 경기도 남동부의 슈라기 화강암 지역에서 채취한 하천퇴적물 시료 내 Co, Cr, Sc 함량 분포도(Fig. 2A)는 화강암체 전역에 걸쳐 모두 낮은 경향이 뚜렷하다(Fig. 2A에서 청색계통). Co는 3.4-14 ppm 범위이고, Cr은 52 ppm 이하로 낮은 편이다. 특히 양평군 남부와 여주군-이천시 일대에는 매우 낮은 Co 함량(<4.3 ppm)과 Cr 함량

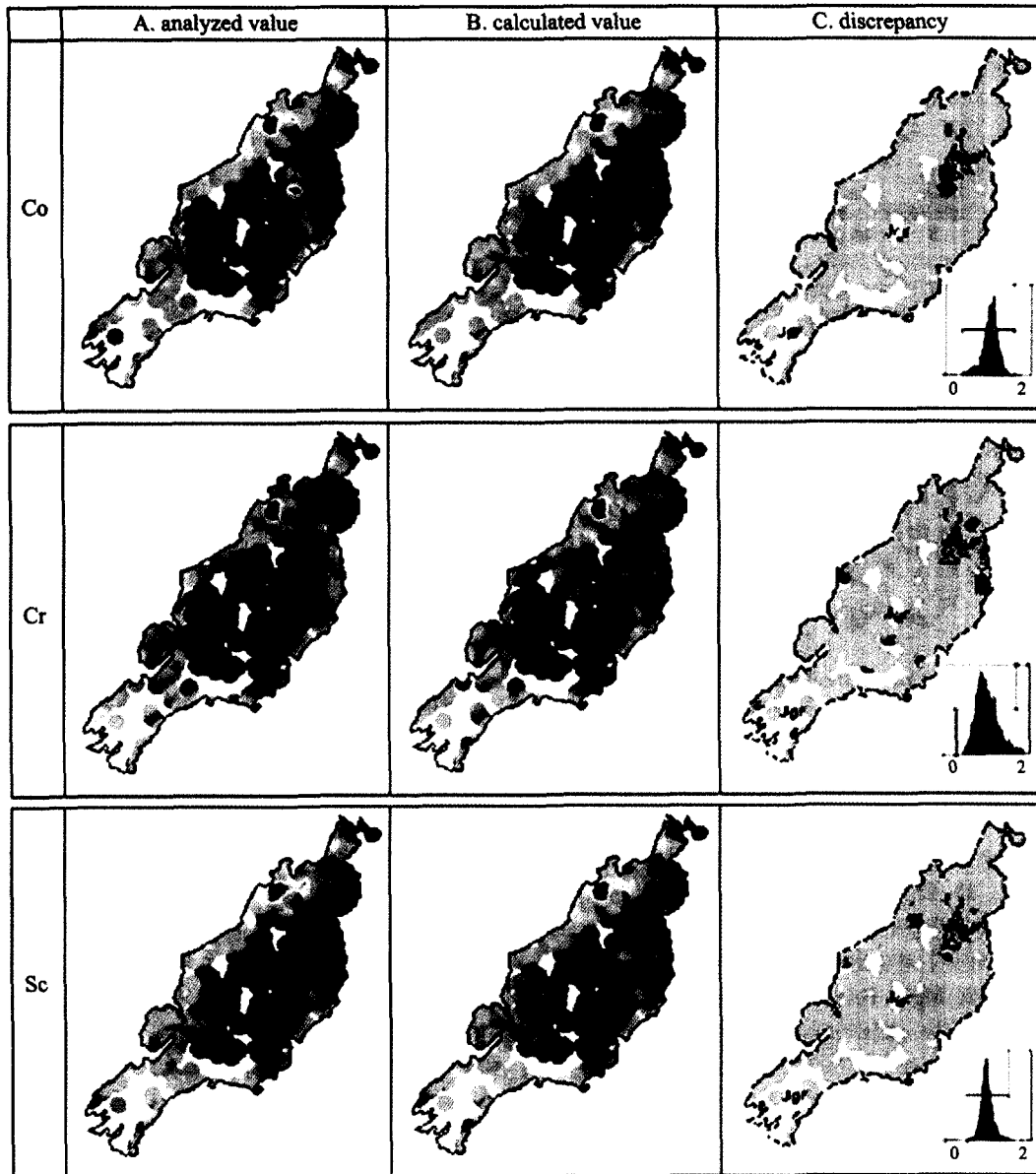
(<14 ppm)을 보이는 침수분지가 많다. Sc 함량은 Co 및 Cr 함량과 좋은 상관관계를 보이나, 암체 전반에 걸쳐 대체로 낮은 경향이 뚜렷하며(4.5-7.6 ppm), 지역에 따라 4.5 ppm에도 못 미치는 곳도 많다. 이러한 분포가 화강암의 분화와 직접적으로 관련된 지구화학적 일차 요인임을 이 연구에서 직접 밝힐 수는 없으나, 하천퇴적물 시료의 Co, Cr, Sc 함량의 결핍현상은 연구 대상 암체처럼 비교적 진화된 화강암체가 갖는 지구화학적 특성을 지시한다. 하천퇴적물 내 원소의 함량은 지표 풍화환경에서의 원소별로 이동도의 차이에 따라 기반암(화강암)의 전암 분석치와 정확하게 일치하지 않는 경우도 있으나, 전반적으로 하천퇴적물의 조성은 전암 조성을 대체로 잘 반영하는 것으로 나타났다. 따라서, 이 연구의 첫 번째 전제조건인 ‘하천퇴적물이 시료

채취지점 상류 집수분지의 지질성분을 대표적으로 잘 반영함'을 입증해 준다.

참고로, 양평일대에 작은 규모로 노출된 트라이아스기 염기성 화성암복합체 분포지역과 그 외 선캠브리아기 편마암과 편암류 등이 분포하는 지역의 하천퇴적물의 Co, Cr, Sc 함량은 매우 높은 함량(Fig. 2A에서

적색)을 보임으로써, 초기 마그마작용 중에 휘석, 각섬석, 침정석, 운모 등이 풍부한 염기성암에 부화되는 경향이 있음을 알 수 있다(신성천 외, 2001).

한편, 회귀식을 이용한 계산으로 구한 함량 분포도(Fig. 2B)를 실제 분석치의 분포도(Fig. 2A)와 비교하면, 서로 전반적으로 유사함을 알 수 있다. 특히 Co,



**Fig. 3.** Regional geochemical maps for Co, Cr, and Sc concentrations in stream sediments over the granite area in Gyeonggi Province (See Fig. 1 for locality). A: Distribution maps drawn from analyzed data. B: Distribution maps drawn based on calculated data using linear regression formula. C: Maps showing the distribution of the discrepancy ratio (ratio=analyzed data/calculated data).



Cr, Sc 등 세 미량원소는 화강암 지역에서 뚜렷하게 낮으며, 통계 계산치와 원래 분석치의 전반적인 분포 패턴이 매우 유사하다. 참고로, 앞에 제시된 회귀식은 경기도 남동부에 분포하는 주라기 화강암 분포지역을 대상으로 설정되었기 때문에, 그 통계적인 계산결과는 화강암 지역 외의 선캠브리아기 변성암류 등 다른 지질 분포지역에는 그대로 적용할 수 없다. 그러므로, Fig. 2에 나타난 것처럼, 퇴적암이나 변성암 지역에서는 회귀식의 계산결과와 실제 분석치 간의 일치도가 화강암 지역에 비해 현저히 떨어지는 것은 당연한 결과이다.

화강암 지역에서 계산치와 분석치의 일치도를 비교하기 위하여 확대시켜 작성하였다(Fig. 3). 이를 보면, 계산치와 분석치가 대부분 지역에서 일치함을 알 수 있다. 따라서 회귀분석에 활용된 화강암 분포지역의 하천퇴적물 중의 원소들의 함량은 기반암의 화학조성과 밀접하게 연관되며, 이들의 함량 변화는 선형 회귀식으로 정의할 수 있을 만큼 특정한 경향을 갖고 있음을 의미한다. 그러므로, '단일 암체에서 그룹 지워진 원소의 함량변화는 통계적으로 일정한 패턴을 보일 것'이라는 두 번째의 전제조건이 합리적임을 의미한다.

두 번째의 전제조건이 합리적일 경우, 하천퇴적물 중의 미량원소 변화는 독립변수로 정의된 관련 원소들의 변화와 회귀식으로 정의될 만큼 정연한 관계를 나타내며, 이러한 관계는 지질학적인 요인과 밀접한 관계를 가진다. 그러므로 이 연구에서 제시한 세 번째의 전제조건인 '통계적인 패턴의 변화를 벗어나는 특이한 이상치 자료의 그룹은 지질기원(geogenic)이 아닌 인위적(anthropogenic) 영향 등 이차적 요인에 기인한 것일 가능성이 큼'을 시사한다.

세 번째의 전제조건을 확인하기 위하여 화강암 지역의 하천퇴적물 분석치를 바탕으로 작성한 함량 분포도(Fig. 3A)와 통계 계산치에 의해 작성한 분포도(Fig. 3B)의 차이를 육안으로 비교하면, 일부 이상지역을 제외하고는 두 도면의 분포패턴이 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 이 연구에서 설정한 회귀식은 화강암 분포 지역 하천퇴적물 중의 일부 원소의 함량수준과 기준치를 예측하는 한 방법이 될 수 있음을 의미한다.

그러나, 광역단계의 통계처리에서 특정 지역에 국부적으로 형성된 특정 원소의 이상치가 이차 오염 등의 요인에 의해 형성된 것인지, 또는 화강암의 분화과정의 지역적 차이나 포획암과 같은 이질적인 암상의 존재에 의해 형성된 것인지를 구분하기는 쉽지 않다. 그러므로, 이 연구에서 도출된 것처럼, 일부 지역을 제외

하고는 회귀식에 의해 계산된 결과가 실제 분석치와 정확히 일치하는 것으로 보아, 회귀식을 이용하여 지구화학적 기준치 설정이 가능함을 시사한다. 특히 Fig. 3에서와 같이, 화강암 북서쪽에 나타나는 높은 함량을 회귀식을 이용해 비교하면(Fig. 3C), 특이한 이상지역이 아님을 알려준다. 반면, 어떤 지역에서는 함량 분포로 볼 때는 특이한 이상현상이 나타나지 않으나(예를 들어, Fig. 3A의 Cr), 비교된 결과를 보면 이상대로 도출되는 경우도 있다(예를 들어, Fig. 3C의 Cr). 아울러, 독립변수로 설정된 원소들 중 한 원소의 농도가 유난히 큰 차이를 보이는 경우에도 이상대로 나타날 수 있다. 이상대의 발생 요인을 정확히 이해하기 위해서는 회귀식에 대한 구체적인 분석이 필요하다.

크롬(Cr)의 경우는 회귀식이  $Cr = -0.244 + 1.855Co + 43.871MgO + 2.53Fe_2O_3 - 0.177V + 1.154Ni - 3.092Sc$ 로 정의되었다. 따라서 계산에 의한 Cr의 함량은 회귀식에서 고려된 6개 원소의 함량에 좌우된다. Cr의 분석치를 계산치로 나눈 비율(즉, discrepancy ratio)를 보강하여 작성한 도면(Fig. 3C)에서는 12개의 이상대가 관찰되었다. 이상대 지역을 회귀식에서 고려된 원소들의 분포도와 중첩하여 비교하여 보면, 1개 이상대는  $Fe_2O_3$ 와 V의 분포도에서, 4개 이상대는 각각 Ni, V, Sc의 분포도에서, 2개 이상대는 Co, Sc, V,  $Fe_2O_3$ 의 분포도에서 각각 주변 지역의 값과 비교하여 현저히 다른 농도값을 보이고 있다. 그러나, 그 외 5개 이상대는 현저한 함량분포 차이가 관찰되지 않았다.

스칸듐(Sc)은 회귀식이  $Sc = 0.72 + 0.38Co + 3.241MgO + 0.556Fe_2O_3 - 0.02806Cr - 0.00254V + 0.0277Ni$ 로 정의되며, 이를 이용하여 7개의 이상대가 도출되었다. 이 중 6개 이상대는  $Fe_2O_3$ , MgO, Co, Cr, Ni의 함량분포가 주변 지역과 현저히 다른 수준이나, 1개 이상대는 현저한 함량 차이를 보이지 않는다.

코발트(Co)는 회귀식이  $Co = -1.511 + 0.842MgO + 0.866Fe_2O_3 + 0.02055Cr - 0.02218V + 0.04191Ni + 0.464Sc$ 로 정의되며, 2개의 이상대가 도출되었다. 첫 번째 이상대 지역은 Cr 함량이 높은 지역과 일치하나, 두 번째 이상대는 분포에 있어 현저한 차이가 관찰되지 않았다.

따라서, 회귀식을 이용하여 도출된 이상대와 분석치를 바탕으로 작성한 이상대를 비교한 결과, 회귀식에서 고려된 원소들 가운데 1-4개 원소는 서로 이상대 영역이 일치하였으나, 일부 원소는 두 가지 경우의 이상대 사이에 전혀 관계가 없는 것으로 나타났다. 즉, 통계분석 결과에서 도출된 이상대 영역을 분석치에 의

해 설정되는 이상대 영역과 중첩시켜 비교해 보면, 기반암의 화학조성의 변화와 관계없는 경우를 쉽게 판별해 낼 수 있음을 알 수 있다.

광역적인 자료를 이용하여 수행한 이 연구에서는 추출된 이상대 영역의 이상현상에 대한 구체적인 원인을 규명하는 것은 연구범위 밖의 일이다. 그러나, 광산 위치와 이차 오염원에 관한 현장정보 등을 고려하면, 일부 이상 지역은 오염원의 위치와 일치하는 수도 있지만, 이차 오염원 또는 폐광산의 하류에 수계가 발달되어 있지 않아 대표시료를 채취하지 않은 경우도 있으므로, 오염원이 존재하는 지역이라 해서 반드시 이상대로 나타나는 것은 아니다. 한편 1:5만 지질도에서의 암상분포와 이 연구에서 추출된 이상대 지역을 서로 비교한 결과에서도 특이한 공통점은 발견되지 않는다. 이러한 점으로 보아, 통계적 접근방법만으로 화학분석 자료를 검증하고 해석하는 것이 쉽지 않음을 알 수 있다. 특히, 자연적인 원소의 수반관계와 관계없이 이차 오염이 크게 개입된 경우 또는 암석학적으로 특이한 함량변화가 예상되는 경우에는 광역적으로 취득한 분석자료로부터 이상대의 원인을 명확하게 규명하기 위해서는 별도의 보완 검증이 필요할 것으로 판단된다.

그러나, 회귀식에 의해 도출된 이상대의 분포와 본래 분석치에 의해 나타난 이상대의 분포가 광역적으로 잘 일치하는 것으로 보아, 통계적 접근방법이 어느 정도의 신뢰성을 가짐을 뜻하며, 이 연구에서 제시한 통계분석 방법을 폭 넓게 적용할 경우, 광역 지구화학 탐사를 통해 이상대 영역의 추출이 어느 정도 가능함을 시사한다.

## 6. 결 론

전국 규모의 광역적인 탐사를 통해 채취한 1-2차 수계의 하천퇴적물 시료를 대상으로 원소별 지구화학 지도를 도면화하기 위하여 분석자료의 공간적 분포를 보간하는 방법을 도출하였다. 자료처리 대상지역의 면적이 도(道) 단위 규모이고 약 2,000-3,500개의 시료수(시료채취 간격 약 3.5 km<sup>2</sup> 당 1 개소)를 기준으로 할 때, 반경 2 km의 지역을 250 m 간격으로 이동하며 중첩하는 역거리 가중법에 의한 보간방법이 계산시간을 크게 줄이고 가장 효율적이라는 결론을 얻었다.

경기도 남동부에 큰 저반상으로 분포하는 주라기 화강암을 표본지역으로 원래 분석치와 회귀식에 의해 계산된 자료를 지구통계적으로 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

보간된 자료를 화소별로 비교하여 요인분석을 수행한 결과, Co, Sc, MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr, V, Ni 등 7가지 성분은 상관도가 높은 요인으로 그룹지어진다. Co, Cr, Sc을 각각 종속변수로, 이들을 제외한 나머지 다른 6가지 성분을 독립변수로 설정하여 회귀분석을 수행한 결과, 일부 이상대를 제외하면 회귀식에 의해 계산된 값의 분포결과는 실제 분석치의 분포경향과 잘 일치하였다. 따라서, 회귀식을 이용하면 원소별 함량의 수준과 기준치를 예측할 수 있는 방법이 될 수 있음을 알 수 있다.

하천퇴적물의 분석치는 대체로 기반암의 조성을 잘 반영한다. 그러나 회귀식에서 종속변수로 사용된 원소들 가운데 일부 원소는 회귀식을 이용하여 도출된 이상대와 분석치를 바탕으로 설정된 이상대 영역이 서로 일치하지 않아, 기반암의 화학조성을 반영하지 않는 경우를 판별해 낼 수 있다. 즉, 이 연구에서 수행한 지구화학적 통계기법을 적용하면, 지질이 갖는 지구화학적 특성에서 크게 벗어나는 이상대 지역을 추출해 내고, 나아가 이들 이상대가 지질기원이 아닌 이차적인 영향에 기인한 것인지를 구분해 내는 데에 매우 효과적인 것으로 검증되었다.

## 사 사

이 연구는 과학기술부에서 시행하는 중점국가연구개발사업의 하나인 자연재해방재기술개발사업의 일환으로 수행되었다. 세심한 심사와 조언을 해 주신 고려대학교 윤성택 교수와 세명대학교 정명채 교수께 감사드립니다.

## 참고문헌

- 김규한 (1992) 남한의 일부 중생대 화강암류의 지구화학적 연구. 광산지질, 25권, p. 435-466.
- 박천영, 김희남, 정연중 (1998) 광양광산 섬록암과 주변 토양에서 중금속 원소의 지구화학적 분산에 관한 연구. 지구과학회지, 19권, 1호, p. 35-55.
- 신성천, 이평구, 진명식, 홍영국, 박성원, 김옥배, 이현구, 박영석, 황상기, 최상훈, 오창환, 김용준, 나기창, 윤성택, 지세정, 이진수, 염승준, 심상권, 김건한, 양명권, 박진태, 이길용, 윤윤열, 천상기, 송윤구, 이수재, 김용욱, 박덕원, 김연기, 이병대, 이한영, 박종권, 이창범, 김통권, 조병욱, 김인준, 이재호, 문상호, 염병우, 윤현수, 유장한, 고상모, 홍세선, 윤옥 (2000) 환경지화학도 작성. 한국자원연구소 연구보고서, 과제번호 N2-03-01-A-04, 272p.
- 신성천, 황상기, 염승준, 이평구, 박성원, 문상호, 유장한, 이현구, 윤성택, 홍영국, 지세정, 진명식, 이진수, 염병우, 김통권, 박종권, 김용욱, 이한영, 고상모, 이창범, 박덕원,

- 김연기, 조병욱, 이병대, 홍세선, 김인준, 최상훈, 김건한, 양명권, 심상권, 박진태, 이길용, 윤윤열, 천상기, 문상원, 박석록, 유연희, 강민주 (2001) 경기도 지구화학 지도책: 한국 지구화학 지도책(1:700,000) 제 1집. 한국지질자원연구원, 78p.
- 심병완, 정상용, 강동환, 김규범, 박희영 (2000) 영산강 섬진강 유역의 지하수 데이터베이스 자료에 대한 지구통계학적 분석. 지질공학회지, 10권, 2호, p. 131-142.
- 이광식, 정재일 (1997) 포항 강수의 안정 동위원소 조성 변화. 자원환경지질학회지, 30권, 4호, p. 321-325.
- 이태섭, 이상규, 홍영국, 황세호, 신성천, 지세정, 임무택, 김통권, 박인화, 김광은, 구성분, 최종호, 문상호, 박영수, 이희일, 성낙훈 (1996) 지구물리·지구화학적 오염영역 탐지 및 감시기술개발 연구(III). 한국자원연구소, 과학기술처 특정과제 연구보고서, 과제번호 KR-96(T)-10.
- 황인호, 전효택 (1994) 무극 함금석영맥광상 화강암질 모암에서의 원소들의 분산형태와 분산범위. 자원환경지질학회지, 27권, 5호, p. 451-458.
- Darnley, A.G., Bjorklund, A., Bolviken, B., Gustavsson, N., Koval, P.V., Plant, J.A., Steenfelt, 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 Sciences 19, UNESCO Publishing, 122p.
- Jin, M.S., Gleadow, A.J.W. and Lovering, J.F. (1984) Fission track dating of apatite from the Jurassic and Cretaceous granites in South Korea, J. Geol. Soc. Korea, v. 20, p. 257-265.

---

2001년 10월 19일 원고접수, 2002년 4월 26일 게재승인.