

하천에 서식하는 민물고둥(다슬기)의 Sr, Pb 동위원소 특성

전서령* · 정재일

전북대학교 지구환경과학과

Sr and Pb Isotopic Properties in Limnetic Gastropod (*Semisulcospira libertina*) Shell in the Jinan, Jeonbuk Area.

Seo-Ryeong Jeon* and Jae-il Chung

Department of Earth and Environmental Sciences, Chonbuk National University, Jeonju 561-781, Korea

The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios between water and biogenic material are similar in marine and lacustrine environment. Pb isotope ratios are, however, reported not to have been corresponding between the biological tissues and ambient water in aquatic system, contrary to the Sr isotope ratios. In order to explore the potential application of two isotopes as environmental tracers, we report here the isotopic compositions of strontium and lead of gastropod shell in fresh water in Jinan area. The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of carbonate shells of gastropod living in fresh stream water, are similar as that of ambient water but are different by sites. The different $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of stream water between the sites is likely caused by the difference of the isotopic composition of Sr derived from rocks in the basin. In contrast, there is a distinct difference of the lead isotopic values between the water and the gastropod shell, suggesting that shell-fish available lead in aquatic system is different from dissolved lead in water. It is assumed that the majority of Pb in stream water is derived from atmospheric Pb accumulated on soil materials over years rather than from rock.

Key words : Sr isotopes, Pb isotopes, gastropod shell, stream water, bedrock

수중생물과 그 생물이 살았던 물과의 Sr 동위원소 조성은 크게 다르지 않으나, Pb 동위원소비는 Sr 동위원소와는 달리 생물과 그 생물이 살았던 물과 상이한 값을 보인다. 이 두 동위원소를 환경추적인자로 동시에 적용할 목적으로 담수에 사는 수중생물인 다슬기(*Semisulcospira libertina*) 껍질의 두 동위원소비를 측정하여 보았다. 하천수에 사는 다슬기 껍질의 Sr 동위원소비는 그들이 살았던 하천수의 동위원소비와는 같은 값을 보이지만, 채취지역에 따라서는 다른 값을 가진다. 하천수의 Sr 동위원소조성이 다른 것은 각 하천수의 기반암의 Sr 동위원소가 서로 다르기 때문으로 결국 하천수중의 Sr은 기반암으로부터 유래하고 다슬기 껍질의 Sr은 하천수에서 기인한 것으로 볼 수 있다. 반면에 Pb 동위원소비는 하천수와 다슬기 껍질이 서로 다른 값을 보이는 것은 하천수에 용해된 Pb이 다슬기가 흡수 가능한 Pb과는 다른 것으로 생각되며, 다슬기 껍질의 Pb 동위원소비는 강우의 Pb 동위원소비와 유사하다. 하천수에 용해된 Pb은 기반암에서 유래한 것이 아니라 토양 중에 집적된 대기기원의 Pb이 대부분인 것으로 생각된다.

주요어 : Sr 동위원소비, Pb 동위원소비, 하천수, 다슬기, 기반암

1. 서 론

생물체에서 생성된 광물질의 안정동위원소 조성은 그 생물이 살았던 환경에 대한 정보를 제공해준다 (Rundel *et al.*, 1988; Lajtha and Michener, 1994).

가벼운 안정동위원소들과는 달리 Sr과 Pb 동위원소는 생물의 영향에 의해 재편성되지 않는다는데 있어서 환경추적인자로서 크게 각광받고 있다.

암석 내에서 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비는 지질시대나 형성과정에 따라 다양한 값을 가지며, Rb/Sr의 함량비나 시간에

*Corresponding author: srjeon@hanmail.net

따라 변화 한다 (Graustein, 1988; Åberg, 1985; Åberg *et al.*, 1989; Bailey *et al.*, 1996). 또한, Sr과 Ca은 지화학적 특성이 서로 비슷하여 시스템 내의 Ca의 이동에 관한 연구에 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비를 이용하여 정량적으로 연구하는 경우가 있다(Åberg *et al.*, 1989; Miller *et al.*, 1993; Bailey *et al.*, 1996). 생태계내의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비의 다양성은 Sr의 근원에 관한 정보와 생태계내의 Sr의 이동특성을 알아내는데 중요한 정보가 된다(Graustein, 1988).

Pb은 ^{204}Pb (2%), ^{206}Pb (25%), ^{207}Pb (21%), ^{208}Pb (52%)의 4개의 안정한 동위원소를 가진다. ^{204}Pb 는 원시 핵종이며, ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb 은 각각 ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th 의 방사능 붕괴에 의해 생성된 것이다. 과거에 Pb 동위원소 조성을 대기과 해양(Tatsumoto and Patterson, 1963; Flegal *et al.*, 1989a), 대륙과 연안 퇴적물(Chow *et al.*, 1973; Shirahata *et al.*, 1980; Ng and Patterson, 1982), 담수환경(Flegal *et al.*, 1989b; Erel and Patterson, 1994; Erel *et al.*, 1991)과 토양(Erel *et al.*, 1997)에서 인위기원의 Pb을 추적하는데 주로 이용되어져 왔다.

해수나 담수 환경에서 수생생물과 생물이 서식하는 물 사이에 Sr 동위원소 조성에는 큰 차이를 보이지 않는 것으로 알려져 있다(Rundel *et al.*, 1988; Lajtha and Michener, 1994). 반면에 납동위원소의 온도나 공간적 다양성 때문에 수계에서 수중생물과 주변 물과의 Pb 동위원소비에 대한 비교는 아직 없었다. 본 연구는 민물 고동인 다슬기의 Sr, Pb 동위원소조성을 통해서 두 동위원소를 환경추적인자로의 동시 적용을 시도해 보고자 한다.

2. 연구지역의 지질 및 연구 방법

연구지역인 진안은 전주에서 동쪽으로 약 50 km 떨어진 곳에 위치한다(Fig. 1). Fig. 1에서 살펴보면, 이 지역은 백악기 퇴적암류를 기반암으로 하고 있으며, 연구지역의 북쪽과 남쪽에 진안층군에 속하는 달길층과 산수동층이 분포하며 그 위를 백악기의 안산암질 응회암층이 정합으로 덮고 있다(Shimamura, 1925). 달길층은 응회암과 셰일의 발달이 우세하며, 산수동층은 주로 사암과 셰일로 구성되어 있다.

1997년 봄에 Fig. 1에서 세일을 기반암으로 하는 A 지역과 응회암을 기반암으로 하는 B지역에서 각각 하천수 및 민물고동인 다슬기(학명; *Semisulcospira libertina*(Gould))와 기반암을 채취하였으며, 하천수는

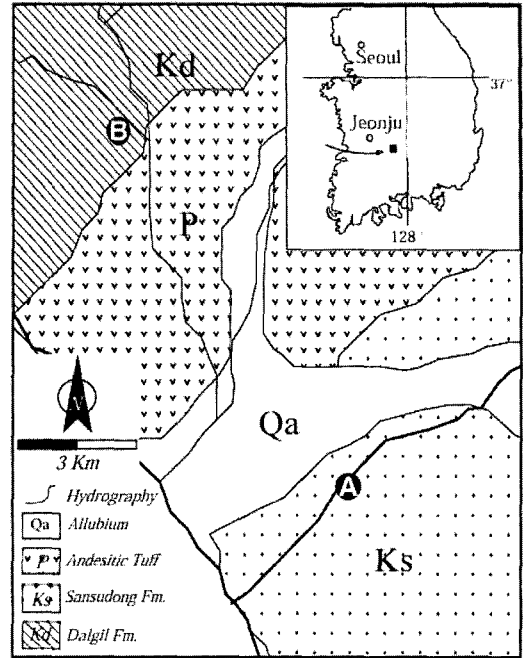


Fig. 1. Geologic map, hydrography and sampling points in the study area (after Shimamura(1925)).

같은 해 가을에 한 번 더 채취하였다. 채취한 하천수는 현장에서 $0.20\ \mu\text{m}$ 멤브레인 필터를 이용하여 여과한 후 250 ml의 폴리에틸렌병에 담아 밀봉하여 실험실로 이동하여 농축한 시료를 분석용 시료로 하였다. 암석은 세척 후 건조하여 분쇄하였으며, 민물고동의 연골부위는 제거하고 껍질부위만 수회 세척한 후 완전 건조하여 아게이트 몰타르(agate mortar)에서 잘게 분쇄하였다.

분말화된 암석과 다슬기 껍질은 질산, 불산, 과염소산의 혼합산에 의해 완전 용해하여 농축한 다음, Na *et al.*(1995)과 Jeon(2000)이 제시한 방법에 의해 Sr은 양이온 교환 칼럼을 이용하여, Pb은 HBr을 이용한 음이온 교환칼럼으로 분리한 후, 일본 쓰쿠바(筑波)대학 지구과학과의 열이온화질량분석기(Thermal Ionization Mass Spectrophotometer; Finnigan MAT 262 RPQ)를 이용하여 Sr과 Pb 동위원소비를 분석하였다. 동위원소비분석에서는 Sr은 인산($1\text{N H}_3\text{PO}_4$)을 이용한 Ta 필라멘트를 Pb에 대해서는 실리카겔과 인산을 이용한 Re 필라멘트를 이용하였다. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 의 전체분석결과에 대한 오차는 $0.00004(2\sigma)$ 이내였으며, 100회 측정된 NBS 987의 평균값은 $0.71024 \pm 0.00001(2\sigma)$ 였다. Pb 동위원소분석은 표준시료 NBS 981을 이용하였으며, 표준시료에 대한 분석값과 오차범위는 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} =$

Table 1. Isotopic compositions of lead and strontium of stream water, gastropod shell, rocks at two sites in the Jinan, Jeonbuk area.

	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
Stream water						autumn	spring
site A	38.079	15.629	18.071	2.107	0.865	0.7157	0.7156
site B	38.051	15.636	18.107	2.102	0.864	0.7163	0.7161
Gastropod shell							
site A	38.627	15.760	18.344	2.106	0.859	0.7160	
site B	38.726	15.784	18.511	2.092	0.853	0.7161	
Rock							
site A(shale)	39.125	15.747	18.959	2.064	0.831	0.7187	
site B(tuff)	39.369	15.792	19.064	2.066	0.829	0.7243	
rain water (Jeonju)	38.429	15.661	18.254	2.105	0.858	0.7130	

$36.519 \pm 0.087 (0.24\%)$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.434 \pm 0.035 (0.23\%)$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 16.896 \pm 0.038 (0.22\%)$ 였다.

실험에 사용되는 모든 시약은 Merck사의 고순도의 특급시약을 사용하였으며, 컬럼실험에서는 오염을 최소화하기 위하여 증류된 염산과 질산을 사용하였다. 동위원소분석을 위한 모든 실험은 청정실험실(clean room)에서 이뤄졌다.

3. 결과 및 토의

3.1. Sr 동위원소

A지역과 B지역에서 채취한 하천수, 다슬기 껍질, 기반암에 대한 Sr과 Pb 동위원소 분석결과를 Table 1에 나타내었다. 강우에 대한 데이터는 연구지역에 인접한 전주에서 전서령(2000)에 의하여 1997년 한해동안 채수한 강우의 데이터를 평균한 값을 인용하였다.

A와 B 두지역의 하천수의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비는 각각 0.7156~0.7157, 0.7161~0.7163으로, A지역이 B지역에 비해 약간 낮은 값을 가진다. 양 지역에서 가을에 채취된 하천수의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비는 봄보다 약간(0.0001) 높은 경향을 보인다. 이 차이는 분석에서 오수 있는 오차인 0.00004보다 크지만, 두 지역의 하천수의 동위원소비의 차를 기술하는데 있어서는 무시할 수 있을 정도로 작은 값으로 생각된다.

Fig. 2에서 Sr 동위원소를 전반적으로 살펴보면, 하천수의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비는 강우보다 높으며, 기반암보다는 낮은 값을 보이고, 다슬기 껍질은 강우나 기반암보다 하천수에 유사한 값을 가진다.

두 지역의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비의 차이는 기반암에서도 나타난다. A지역의 기반암인 셰일은 0.7187이며, B지역의 기반암인 응회암은 0.7243으로 A지역이 B지역에 비해

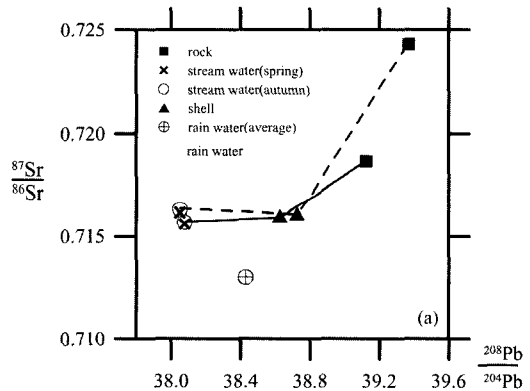


Fig. 2. Comparison of isotopic ratios of Sr and Pb in stream water, shell, and rock in the basin. Solid line and dashed line indicate locations, A and B, respectively. Shaded area are a range of rainwater in Jeonju located at 50 km west to the basin (from Jeon, 2000).

기반암의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비도 낮은 것을 알 수 있다. 이는 하천수의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비는 기반암의 영향을 받는 것으로 해석할 수 있다. 즉, 하천수에 용해된 Sr은 기반암에서 용해된 것이 많은 부분을 차지한다고 할 수 있다.

각 지역에서 채취된 다슬기 껍질의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비는 각각 0.7160, 0.7161로 A지역이 B지역에 비해 낮은 값을 보인다. 이들 다슬기 껍질의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비는 주변 하천수와 유사하나 0.0002~0.0004정도로 하천수보다 낮게 나타난다. Rundel *et al.*(1988)과 Lajtha and Michener(1994)는 수중 생물체에서 생성된 광물질의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비가 그들이 살았던 물의 동위원소비 값과 유사한 것으로 보고한 바 있다. 다슬기 껍질의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비는 다슬기가 살았던 일생동안의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비의 평균 값이라 할 수 있으며, 다슬기 껍질에서 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비가 주변 하천수보다 다소 낮은 값을 보이는 것은 계절(은

도변화)에 따른 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비의 다양성을 의미한다고 볼 수 있다.

3.2. Pb 동위원소

Pb 동위원소 조성은 Sr 동위원소 조성과는 달리 A 지역과 B지역의 하천수에서 큰 차이가 없으며, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 이 각각 38.05~38.08, 15.63~15.64, 18.07~18.11을 보여주었다(Table 1). 하천수의 Pb 동위원소 조성은 기반암에 비해 훨씬 낮은 값을 보여주고 있어 하천수에 존재하는 Pb는 기반암에서 오는 것이 아님을 지시한다고 볼 수 있다.

진안에서 서북서쪽으로 약 50 km가량 떨어진 전주 지역은 진안지역보다 도심지역이나 진안지역에서 직접 채수한 강우가 없어 인접지역인 전주지역의 데이터를 인용하였다. 이 지역 강우의 Pb 동위원소비는 Jeon (2000)의 논문에서 인용한 것으로 Mukai *et al.*(1993, 1994)에 의해 보고 된 1987~1988년의 서울지역 에어로졸의 값에 유사하며, 진안지역 하천수의 Pb 동위원소비와도 유사한 값을 가진다. 하천수에 유입된 대기 기원의 Pb는 하상퇴적물이나 유기물에 흡착되어 하천수의 동위원소 조성에는 영향을 미치지 않으며, 흡착된 Pb는 고정되어 오랫동안 잔존하는 것으로 알려져 있다 (Smith and Siccama, 1981; Friedland and Johnson, 1985). 그러나, 연구 지역의 경우, 하천수와 강우의 Pb 동위원소 조성이 유사한 것으로 보아, 대기기원의 Pb 이 하상퇴적물이나 수중 유기물중에 과흡착되어 하천수의 Pb 동위원소 조성이 강우와 유사한 것으로 생각된다(Fig. 3).

Fig. 2에서 살펴보면, 하천수의 Pb는 대기기원의 Pb보다 비방사성기원으로 낮은 값을 보여주고 있으며, 강우의 Pb 동위원소는 하천수와 다슬기 껍질의 중간부분에 해당한다. 기반암의 Pb 동위원소 조성은 하천수나 다슬기 껍질보다 훨씬 높은 값을 보여주고 있어, 하천수중의 Pb이 기반암에서 왔다고 보기는 어렵다. Erel *et al.*(1994)은 암석의 풍화과정중 용해되기 쉬운 Pb는 전암의 Pb 동위원소 조성보다 오히려 높은 경우가 있음을 시사하고 있어 하천수중의 Pb이 기반암에서 왔을 가능성은 훨씬 적어 보인다.

다슬기 껍질의 동위원소 조성은 A지역의 다슬기가 각각 38.62, 15.76, 18.94의 값을 B지역의 다슬기가 38.73, 15.78, 18.51을 보여주어 다슬기 껍질의 Pb 동위원소비는 하천수와는 다른 값을 가진다. 다슬기 껍질과 물 사이의 동위원소적 분별은 없을 것으로 생각되며, 그 차이는 하천수중의 Pb의 시간적 변화나 불균일

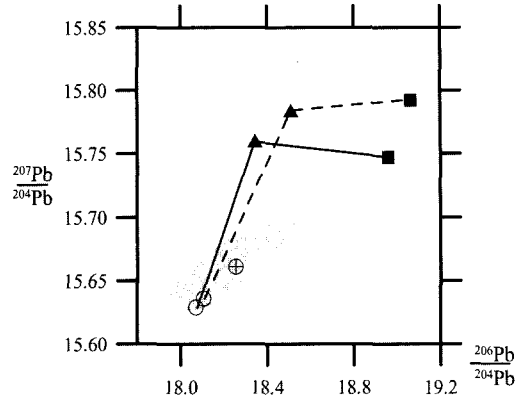


Fig. 3. Comparison of Pb isotopic ratios ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) in stream water, shell, and rock in the basin. Symbols are the same as in Fig. 2.

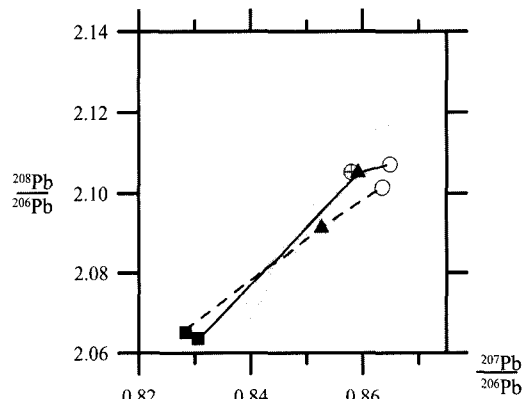


Fig. 4. Comparison of Pb isotopic ratios ($^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ and $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$) in stream water, shell, and rock in the basin. Symbols are the same as in Fig. 2.

한 분포에 따른 것으로 생각할 수 있다. 강우의 Pb 동위원소는 Fig. 4에서 그 변화의 폭이 넓게 나타나고 있으며, 변화 유형이 하천수와는 다르다고 볼 수 있다. Mukai *et al.*(1993, 1994)에 의하면 대기기원의 Pb는 과거 휘발유의 첨가제로 사용되는 납의 종류에 따라 또는 무연(無鉛)휘발유의 사용이 확산되면서 Pb 동위원소 조성도 변화되어 왔음을 보고한 바 있다. 그러나, 대기 기원 Pb의 시간적 변화만으로 하천수와 다슬기 껍질사이의 Pb 동위원소비 차이를 설명하기는 어렵다. 더욱이, 다슬기 껍질의 Pb 동위원소비는 강우와 기반암의 중간 값을 보이지만, 이들이 강우와 기반암과의 혼합 선상(mixing line)에 오지는 않아 그 기원을 설명하기가 더욱 어렵다(Fig. 3). Erel *et al.*(1991)은 하천수중 Pb의 많은 부분은 유기물 입자나 철산화물 등에 선택

적으로 흡착되며, 하천수의 Pb 동위원소는 사용된 여과지의 입자 크기에 따라 달라질 수 있다고 보고한 바 있다. 수중생태계에서 다슬기의 성장동안 껍질에 형성된 Pb는 하천수중의 0.2 μm(여과지의 입자크기)입자보다 작은 크기의 Pb과는 다르다고 보는 것이 더 적당하다고 생각된다.

4. 결 론

다슬기(*Semisulcospira libertina*) 껍질의 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 비는 그들이 살았던 하천수(담수)의 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 비와 유사하나, 지역에 따라 다르게 나타난다. 그 차이는 하천수중의 Sr의 근원이 되는 기반암의 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 비가 다르기 때문이다. 즉 하천수중의 Sr은 기반암기원이라고 볼 수 있다. 반면에 하천수의 Pb 동위원소비는 기반암보다는 강우와 유사하여 하천수중의 Pb은 기반암기원이라기보다는 대기기원의 Pb으로 생각된다. 또한, 다슬기 껍질과 하천수간의 Pb 동위원소 조성도 다르게 나타나고 있어, 민물고둥인 다슬기의 껍질을 구성하는 Pb은 하천수중의 0.2 μm 입자보다 작은 크기의 Pb과는 다른 것이라고 볼 수 있다.

사 사

본 연구를 위해 제반 실험을 위한 장소의 제공과 분석기기의 사용에 도움을 준 일본 쓰쿠바대학(筑波大學) 자원환경 연구실의 가지와라(梶原 良道)선생님, 나가노(中野 孝教)선생님, 요코오(横尾 頼子)박사를 비롯한 모두에게 감사한다.

참고문헌

Åberg, G. (1985) The use of natural strontium isotopes as tracers in environmental studies. *Water, Air Soil Pollution*, v. 79, p. 309-332.
 Åberg, G., Jacks, G. and Hamilton, P. J. (1989) Weathering rates and ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios: and isotopic approach. *Journal of Hydrology*, v. 109, p. 65-78.
 Bailey, S. W., Hornbeck, J. W., Driscoll, C. T. and Gaudette, H. E. (1996) Calcium inputs and transport in a base-poor forest ecosystem as interpreted by strontium isotopes. *Water Resources Research*, v. 32, p. 707-719.
 Chow, T. J., Bruland, K. W., Bertine, K. K., Souter, A., Koide, M. and Goldberg, E. D. (1973) Records in Southern California coastal sediments. *Science*, v. 181, p. 551-552.
 Erel, Y. and Patterson, C. C. (1994) Leakage of industrial

lead into the hydrocycle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 58, p. 3289-3296.
 Erel, Y., Morgan J. J. and Patterson, C. C. (1991) Natural levels of lead and cadmium in a remote mountain stream. *Gochim. Cosmochim. Acta*, v. 55, p. 707-719.
 Erel, Y., Harlaban, Y. and Blum, J. D. (1994) Lead isotope systematics of granitoid weathering. *Gochim. Cosmochim. Acta*, v. 58, p. 5299-5306.
 Erel, Y., Veron, A. and Halicz, L. (1997) Tracing the transport of anthropogenic lead in the atmosphere and in soils using isotopic ratios. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 61, p. 4495-4505.
 Flegal, A. R., Duda, T. F. and Niemeyer, S. (1989a) High gradients of lead isotopic composition in northeast Pacific upwelling filaments. *Nature*, v. 339, p. 458-460.
 Flegal, A. R., Nriagu, J. O., Niemeyer, S. and Coals, K. H. (1989b) Isotopic tracers of lead contamination in the Great Lakes. *Nature*, v. 339, p. 455-458.
 Friedland, A.J. and Johnson, A. H. (1985) Lead distribution and fluxes in a high-elevation forest in Northern Vermont. *Journal of Environmental Quality*, v. 14, p. 332-336.
 Graustein, W. C. (1988) ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios measure the source and flow of strontium in terrestrial ecosystems. *Stable isotopes in ecological research*. Springer-Verlag.
 Jeon, S. R. (2000) Environmental Geochemistry of the abandoned Dongjin Au-Ag-Cu mine area, Korea. Ph. D. thesis, University of Tsukuba. 144p.
 Lajtha, K. and Michener, R. H. (1994) *Stable isotopes in Ecology and Environmental Science*, Blackwell Science. Publisher, 316p.
 Miller, E. K., Blum, J. D. and Friedland, A. J. (1993) Determination of soil exchangeable-cation loss and weathering rates using Strontium isotopes. *Nature*, v. 362, p. 438-441.
 Mukai, H., Furuta, N., Fujii, T., Ambe, Y., Sakamoto, K. and Hashimoto, Y. (1993) Characterization of Sources of Lead in the Urban Air os Asia Using Ratios of Stable Lead Isotopes. *Environmental Science of Technology*, v. 27, p. 1347-1356.
 Mukai, H., Tanaka, A., and Fujii, T. (1994) Lead isotope ratios of airborne particulate matters as tracers of long-range transport of air pollutant around Japan. *Journal of Geophysics, Research* v. 99, no. D2, p. 3717-3726.
 Na, C. K., Nakano, T., Tazawa, K., Sakagawa, M. and Ito, T. (1995) A systematic and practical method of liquid chromatography for the determination of Sr and Nd isotopic ratios and REE concentrations in geological samples. *Chemical Geology*, v. 123, p. 225-237.
 Ng, A. C. and Patterson, C. C. (1982) Changes of lead and barium with time in California off-shore basin sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 46, p. 2307-2321.
 Rundel, P. W., Ehleringer, J. R. and Nagy (1988) *Stable Isotopes in Ecological Research*, Springer-Verlag, 525p.
 Shimamura, S. (1925) *Geological Atlas of Chosen (Korea; 1:50,000)*. Chinan and Cheonju sheets. Geological Survey of Korea. no. 5.
 Shirahata, H., Elias, R.W., Patterson, C.C. and Kode, M.

- (1980) Chronological variations in concentrations and isotopic compositions of anthropogenic atmospheric lead in sediments of a remote subalpine pond. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 44, p. 149-162.
- Smith, W. H. and Siccama, T. G. (1981) The Hubbard Brook ecosystem study: Biogeochemistry of lead in the northern Hardwood forest. *Journal of Environmental Quality*, v. 10, p. 323-333.
- Tatsumoto, M. and Patterson, C.C. (1963) The concentration of common lead in seawater. In *Earth Science and Meteorics*. J. Geiss J. and Goldberg E.D. (eds), North-Holland. p. 74-89.

2004년 12월 23일 원고접수, 2005년 3월 8일 게재승인.