

장흥지역 1차수계 하상퇴적물의 지질집단별 지구화학적 특성과 하천수에 대한 연구

박영석^{1*} · 김종균¹ · 한민수² · 김용준³ · 장우석⁴ · 신성천⁴

¹조선대학교 자원공학과, ²국립문화재 연구소, ³전남대학교 지질학과, ⁴한국지질자원연구원

Geochemical characteristics on the petrological groups of stream sediments and water in primary channels of the Jangheung area, Korea

Young Seog Park^{1*}, Jong Kyun Kim¹, Min Su Han², Yong Jun Kim³, Woo Seog Jang⁴ and Seong Cheon Shin⁴

¹Dept. of Mineral Resource Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

²National Research Institute of Cultural Properties, Seoul 110-050, Korea

³Dept of Geology, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

⁴Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

The purpose of this study is to find out geochemical characteristics of stream sediments which are good indicator of geochemical hazard valuation and water in primary channels of the Jangheung area. We separated three groups which were granitoid area, granite gneiss area and tuffeous area by petrological properties. Physical and chemical characteristics of stream water such as temperature, pH, and EC were measured in the field between 1999 and 2001 and stream sediments samples were collected from April to May in 1999. For the chemical analysis of stream sediments samples, XRF, ICP-AES and NAA were used. The contents of the major elements had a similar contents in three groups and those of rare earth elements in granite gneiss area were lower value than those of other two groups. Zn and Cu were higher value than the other toxic elements. Through the enrichment factor and enrichment index features of the elements, we knew that Fe₂O₃, MgO, TiO₂, MnO and Eu, Yb of the tuffeous area samples and Co, Cr, Zn were enriched.

Key words : stream sediments, geochemical hazard, chemical analysis, enrichment factor, enrichment index

본 연구는 지화학적 재해를 평가하는 좋은 지시자인 하상퇴적물에 대하여 지질집단별 지구화학적 특성과 하천수의 특성을 장흥지역 1차 수계를 중심으로 밝히고자 한다. 암석의 생성시기와 지질학적 환경에 따라 풍화에 영향을 받은 정도에 차이가 많은 점을 고려하여 연구지역의 지질을 화강암류지역, 화강암질편마암류(일부 변성퇴적암류포함)지역, 응회암류지역으로 나누어 주성분원소, 미량원소, 희토류원소, 독성원소 등의 분포특성에 대하여 기술하였다. 하천수에 대한 온도, pH, 전기전도도 등의 물리화학적 특성은 1999년과 2001년에 현장에서 측정하였고, 하상퇴적물 시료는 1999년 4월과 5월에 걸쳐 채취하였으며, XRF, ICP-AES, NAA를 이용하여 화학분석을 실시하였다. 주성분원소의 함량은 지질집단에 관계없이 비슷한 함량비를 나타냈으며, 희토류원소는 화강암질편마암류(일부 변성퇴적암류 포함)지역에서 다른 두 지역에 비해 낮게 나타났고, 독성원소 중 Zn과 Cu가 비교적 높은 함량을 나타내었다. 부화계수와 부화지수를 도출한 결과 주성분 원소에서는 Fe₂O₃, MgO, TiO₂, MnO가, 희토류원소에서는 응회암류지역의 시료들 중 Eu, Yb가, 독성원소에서는 Co, Cr, Zn에서 약간의 부화경향을 나타냈다.

주요어 : 하상퇴적물, 지화학적 재해, 화학분석, 부화계수, 부화지수

*Corresponding author: yspark@chosun.ac.kr

1. 서 론

인간은 자연 환경에서 발생하는 유해 원소의 과다농집이나 필수원소의 이상결핍과 같은 지화학적 재해에 노출되어 있으며, 지화학적 재해는 그 특성상 자연 환경에서 계속적으로 이동되고 오랜 시간에 걸쳐 사람이나 동식물에게 악영향을 누적시키고, 눈에 잘 띄지 않고 서서히 진행되어 넓은 지역으로 확산되는 경우가 많아 그 피해의 심각성은 매우 커 이들에 대한 체계적이고 정확한 기초조사와 방지대책의 수립이 필요하다.

이번 연구는 지화학적 재해를 평가하기 위한 기초적인 자료수집으로 장흥지역 1차 수계(일부 2차 수계)의 하천수에 대해 pH, 전기전도도, 온도의 특성을 파악하고, 하상퇴적물에 대해 지질질단별(화강암류 지역, 화강편마암류(일부 변성퇴적암류 포함) 지역 및 응회암류 지역) 주성분원소, 미량원소, 희토류원소, 독성원소 등의 원소별 존재량과 분포상태, 상호관계, 원소의 거동 및 부화 등의 지구화학적 특성을 파악하여 유해성분의 과다농집이나 필수원소의 이상결핍에 관한 정보를 제공해, 연구지역에서 앞으로 발생 할 수 있는 인위적인 이차 오염의 평가 기준치로 활용하고자 한다.

2. 지형과 수계 및 지질특성

연구지역은 소백산맥 남서부에 해당하며 행정구역상으로 전남 강진군, 장흥군 및 보성군에 위치하고 지리적 좌표로는 북위 34°30'~34°45', 동경 126°45'~127°00' 범위에 속한다. 이 지역의 산은 지형윤회상 장년기에 속하는 산들로, 북서쪽의 화방산을 기점으로 성낙산과 성자산이 있고, 남동쪽에는 천관산, 천태산, 부용산, 광춘산, 역불산 등이 발달하여 있다. 하천은 장흥군 장흥읍을 통과하여 북동-남서 방향으로 흐르는 탐진강이 있고, 수인산을 중심으로 발달한 1, 2차 수계는 탐진강으로 유입되고 있으며, 천관산과 천태산을 중심으로 발달한 1, 2차 수계는 주로 동쪽으로 흘러 남해로 유입되는 형태를 보이고 있다(장기홍과 김기태, 1967; 최유구와 윤형대, 1968).

연구지역은 한반도의 지체구조구(김옥준과 박봉순, 1980)에서 영동-광주함몰대에 속하고, 옥천지향사대의 화성암의 분류에서 동남대(김용준 등, 1993; 1994)에 속하는 곳이다. 일반적인 지질분포는 선캠브리아기의 편마암류와 변성암복합체를 기저로 하여 주라기의 강진화강암이 소규모로 관입 분포되어 있고, 그 위에 부

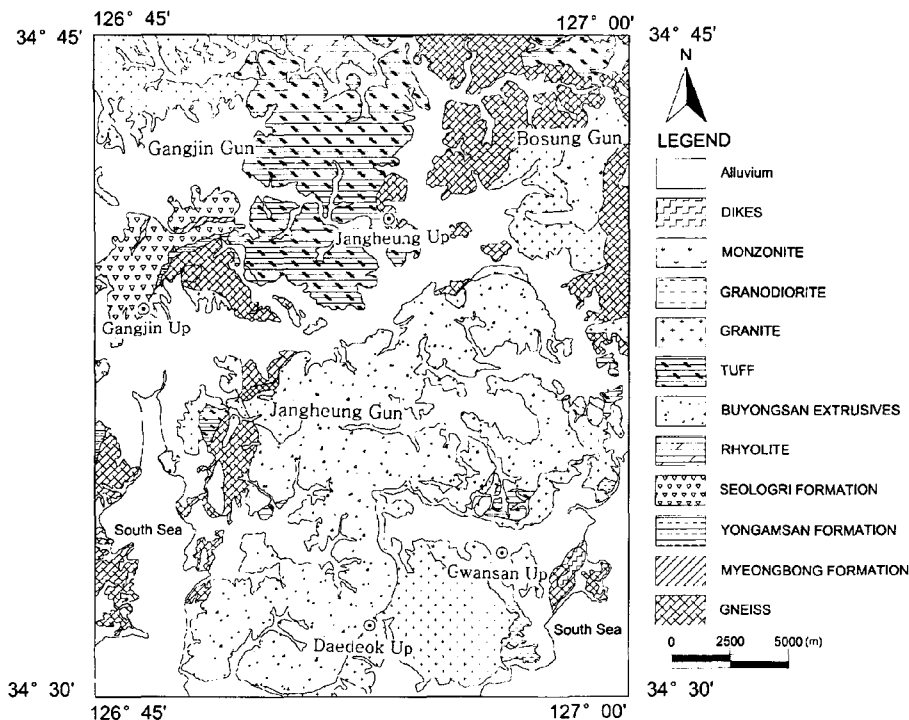


Fig. 1. Geological map of the Jangheung area.

정합으로 백악기의 화산암류가 덮고 있으며, 이들 모두를 백악기 화강암류인 몬조니암, 화강섬록암 및 미문상 화강암이 관입하고 있다(Fig. 1).

연구지역의 암석은 시대미상의 편마암류 및 편암류, 쥬라기의 것으로 여겨지는 흑운모화강암(강진화강암으로 명명), 백악기의 분출암류, 응회암, 산성심성암류 및 백암류이다. 편마암류는 퇴적암기원의 준편마암으로 연구지역의 전역에 걸쳐서 골고루 분포하고 있으며, 대체로 화강암화 작용을 받았다. 편암류는 하부로부터 용암산층이라 명명된 규암층과 설옥리층으로 명명된 편암과 규암의 호층으로 구성된다. 흑운모화강암(강진화강암)의 상세한 생성시대를 동정할 자료는 본 역에서 찾을 수 없으나 연구지역 중앙부에서 백악기 지층으로 피복되고 전기 편암류의 하위연속체를 병입한 사실로 미루어 대략 고생대후기 이후 쥬라기 말 이전에 생성된 것으로 알 수 있으며, 암상으로 보아 광주화강암과 거의 같은 시기의 것으로 추정된다(김용준 등, 1993, 1994; 주승환과 지세정, 1990). 분출암은 라필리 응회암이 우세하며 응회암, 라필리응회암, 응회각력암 및 용암류가 이에 속한다. 응회각력암의 각력의 크기는 10~30 cm에까지 달한다. 심성암류는 상기한 모든 암류를 관입한 형태로 곳곳에서 노출되어 있는데 이는 미문상 화강암, 화강섬록암 및 몬조니암으로 분류되나 이들은 모두 동암장분화체이다. 이 심성암류는 지표 가까이까지 관입되어 있고, 연구지역의 분출암은 그 위에 떠 있는 것 같은 산상을 하고있어 그 접촉변질부가 지표에 많이 노출되어 있다. 이 심성암류의 관입과 동시 또는 그 이후에 규장암, 석영반암 등 산성맥암류와 몬조니반암, 안산반암 등 중성맥암류가 관입되어 있으며, 이 모든 심성암류 및 맥암류는 불국사 화성암류에 대비된다(장기홍과 김기태, 1967; 최유구와 윤형대, 1968).

3. 시료채취 및 분석

하천수에 대한 물리화학적인 특성을 알아보기 위해 하상퇴적물 시료 채취시 pH, 전기전도도(EC), 온도(T) 등을 pH meter(TOA HM-21P), EC meter(TOA CM-12P)를 이용하여 현장에서 측정하였다.

하상퇴적물 시료는 현재 물이 흐르고 있는 1차 수계(일부 2차 수계)를 대상으로 오염의 가능성이 적은 곳을 선정하여, 5~10군데에서 여러 번에 걸쳐 조금씩 채취하여 복합 시료로 만들어 시료의 대표성을 높였으며, 채취지점의 하천수에서 100 mesh 표준망체(150 μm)로

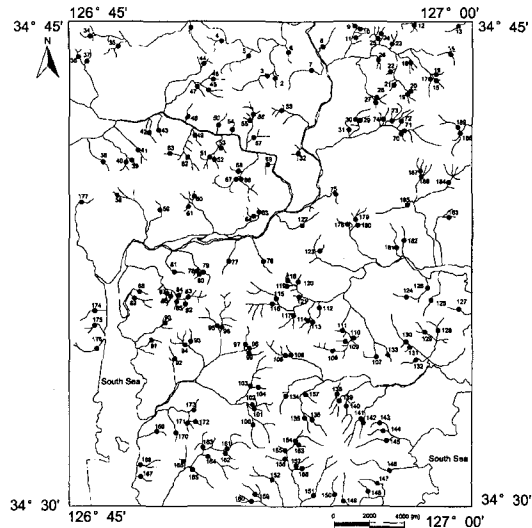


Fig. 2. Sampling sites map of stream sediments and water in the Jangheung area.

체질을 하여 빠져 나온 입자만을 대상으로 189개의 시료를 채취하였다(Fig. 2). 체질 과정에서 발생하는 콜로이드상의 부유물들은 부피에 비해 표면적이 매우 크므로 많은 양의 금속을 운반할 수 있는 것으로 알려져 있기 때문에(Thornton, 1983), 이 미립의 부유물들은 일정 시간을 가라앉힌 후에 따라 내어 분석에서 발생할 수 있는 오차를 줄이고자 하였다. 채취된 시료는 실내에서 30~50일 정도 자연건조 한 후, 알루미늄 유발과 막자를 이용하여 가볍게 분쇄하였으며, XRF, ICP-AES, NAA분석을 위해 200 mesh 이하로 재 분쇄한 시료를 준비하였다.

하상퇴적물의 화학분석은 한국지질자원연구원에서 실시하였다. 주성분원소 분석은 일본 Shimadzu사의 MXF-2100 X-선 형광분석기(x-ray fluorescence spectrometry: XRF)로, 미량원소 분석은 프랑스 Jovin-Yvon Equipment 사의 Jovin Yvon JY-38plus 유도결합플라즈마 원자방출분광분석기(inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry: ICP-AES)로, 일부 미량원소와 희토류원소에 대한 분석은 중성자 방사화 분석(neutron activation analysis: NAA)을 이용하여 분석하였다. 이때 중성자 발생은 하나로 원자로(hi-flux advanced neutron application reactor)를 이용하였고, HPGe γ-ray 검출시스템을 이용한 고분해능 감마선 검출기와 EG & G사의 Ominigam 프로그램을 이용한 감마스펙트럼분석을 하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 하천수의 특성

하천수는 주변 암석의 종류, 지질학적 특징 그리고 기타 오염원의 종류 등과 같은 자연 환경을 알게 해주는 중요한 매개체이며, 하천수의 물리화학적 특성 중 pH는 중금속의 부화 및 오염 지수가 높을수록 낮아지고, EC는 높아지는 것으로 알려져(Nimick and Moore, 1991) 있어 하천수의 물리화학적 특성은 하상퇴적물내의 원소의 분산이나 부화 등을 연구하는데 매우 중요한 지표가 된다.

연구지역 하천수의 물리화학적 특성은 1999년 4월과 5월에 걸쳐 182개 조사 지점을 선정하여 온도, pH와 전기전도도(EC)를 현장에서 측정하였고, 지질집단은 암석의 생성시기와 지질학적 환경에 따라 풍화에 영향을 받은 정도에 차이가 많은 점을 고려하여 화강암류지역(Gr지역), 화강암질편마암류지역(일부 변성퇴적암류 포함, Ggn지역), 응회암류지역(Tf지역)으로 나누었고, 2001년 10월에 1999년에 조사한 지역중 70곳을 선별하여 온도, pH, 전기전도도(EC)를 재조사 하여(Table 1) 시간에 따른 변화를 알아보았다. 그 결과 온도(T)는 1999년에 11.4~22.8°C, 2001년에는 13.4~23.0°C, pH는 1999년에 6.51~7.82, 2001년에 5.53~7.72, 전기전도도(EC)는 1999년에 6.74~160.20($\mu\text{S}/\text{cm}$), 2001년에는 14.40~159.60($\mu\text{S}/\text{cm}$)로 계절적, 시간적 변화는 전체적으로 뚜렷한 변화 경향을 보이지 않아 외부 영향을 적게 받은 것을 알 수 있었다.

4.2. 하상퇴적물의 특성

하상퇴적물은 하천수에 비해 운반, 보관 및 분석이 용이하고, 시간적 변화가 적어 오염원이 존재하는 지역에서 환경영향을 평가하는 좋은 지구화학적 매개체이며(Thornton, 1983), 하상퇴적물의 화학조성은 근원암의 기원을 결정하는 중요한 정보를 제공하고(Cullers,

1988; Cullers *et al.*, 1983), 하상퇴적물의 지구화학적, 광물학적 특성과 각 원소들의 이동상은 잠재적 오염 정도와 원소들의 분포특성 및 상호관계, 오염원의 종류, 유입속도 등의 정보를 제공해, 하천 수계의 잠재적 오염과 이동, 부하에 관하여 보다 체계적이고 정확하게 알 수 있게 한다. 본 연구에서는 지질집단을 암석의 생성시기와 지질학적 환경에 따라 풍화에 영향을 받은 정도에 차이가 많은 점을 고려하여 세 개의 집단으로(Gr지역; 화강암류지역, Ggn지역; 화강암질편마암류(일부 변성퇴적암류 포함)지역, Tf지역; 응회암류지역) 나누고, 각 지질집단에서 채취한 하상퇴적물에 대해 주성분 원소, 희토류원소, 독성원소, 그 외의 미량원소 등으로 세분하여 그 특성을 고찰하였다.

4.2.1 주성분원소

주성분원소에 대한 화학분석 결과는 Table 2에 정리

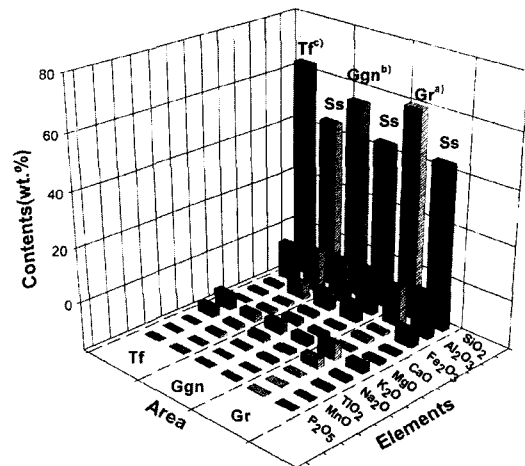


Fig. 3. The comparison of mean values between stream sediments and rocks for major elements in the Jangheung area (Ss: stream sediments, Gr^a: the data of Nockolds, S.R. and Allen, R. (1954), Ggn^b: the data of Cho (1992), Tf^a: the data of Hildreth (1979)).

Table 1. Comparison of physicochemical properties measured at different periods in the Jangheung area.

Data	T(°C)		pH		EC($\mu\text{S}/\text{cm}$)	
	May 1999	Oct 2001	May 1999	Oct 2001	May 1999	Oct 2001
Number of samples	182	70	182	70	182	70
Minimum Value	11.40	13.40	6.51	5.53	6.74	14.40
Maximum Value	22.80	23.00	7.82	7.72	160.20	159.60
Standard Deviation	2.56	1.73	0.31	0.47	22.92	28.87
Mean	16.60	17.20	7.15	6.58	60.42	79.63
Variance	6.55	2.98	0.09	0.22	525.14	833.28

Table 2. Chemical compositions for major elements of stream sediments in the Jangheung area.

Data (wt.%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	
No. of Samples	189	189	189	189	189	189	189	189	189	189	
Mean	Gr	57.08	15.84	5.67	0.95	1.13	2.93	1.18	0.81	0.13	0.15
	Ggn	57.22	16.04	6.59	0.93	1.39	2.82	1.02	0.89	0.13	0.15
	Tf	58.27	14.73	5.36	0.92	1.11	2.71	1.13	0.83	0.12	0.15
Min.	Gr	47.73	12.57	3.55	0.31	0.58	2.17	0.66	0.53	0.06	0.03
	Ggn	45.60	12.41	3.42	0.34	0.53	2.12	0.55	0.54	0.05	0.06
	Tf	46.40	11.84	2.60	0.25	0.53	1.74	0.62	0.44	0.05	0.04
Max.	Gr	67.03	20.25	10.03	2.54	2.48	4.81	2.18	1.36	0.31	0.57
	Ggn	68.42	19.52	9.68	1.71	2.49	3.49	1.76	1.68	0.33	0.26
	Tf	69.14	20.00	10.45	4.71	2.91	3.52	2.76	1.47	0.28	0.41
Std.dev.	Gr	4.50	1.96	1.49	0.48	0.52	0.49	0.32	0.19	0.04	0.09
	Ggn	5.54	1.53	1.48	0.38	0.55	0.36	0.30	0.19	0.05	0.05
	Tf	4.86	1.67	1.69	0.53	0.44	0.31	0.28	0.21	0.04	0.07

Max.: maximum, Min.: minimum, Std.dev.: standard deviation, No. of Samples: number of samples, Gr: granitoid area, Ggn: granite gneiss area, Tf: tuffeous area

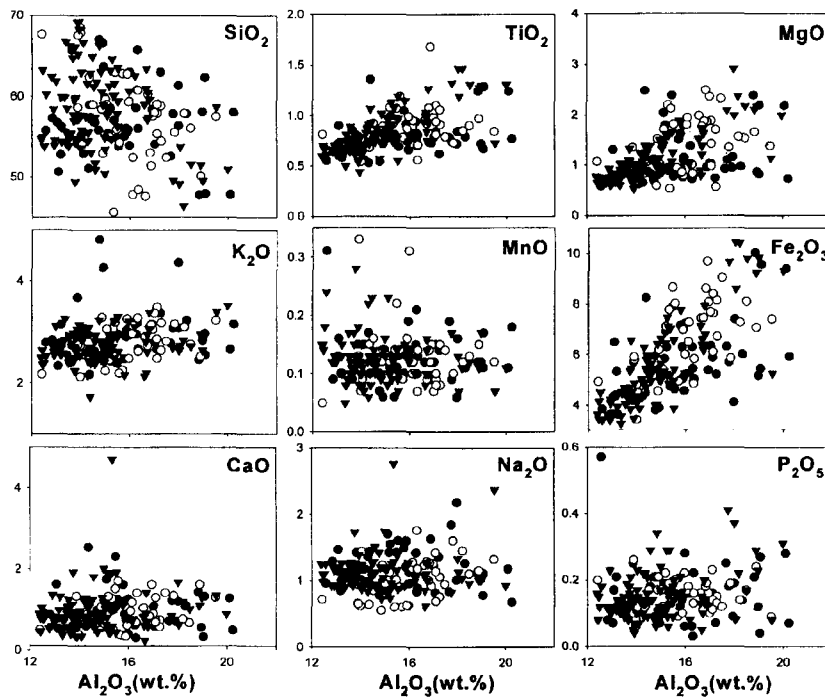


Fig. 4. Variation diagrams of major elements versus Al₂O₃ for stream sediments samples in the Jangheung area (●: granitoid area ○: granite gneiss area ▼: tuffeous area).

하였다. 주성분원소의 평균 함량을 비교해 볼 때 Ggn 지역에서 Fe₂O₃의 함량이 약간 높게 나타났을 뿐, 다른 주성분원소의 함량은 지역이나 지질집단에 상관없이 거의 비슷한 함량값을 나타내었다. 하상퇴적물의 함량치를 모암과 같은 종류의 암석에서 얻은 분석치와

서로 비교하여 3D bar chart로 도시했다(Fig. 3).

Fig. 3에서 하상퇴적물의 함량치는 암석과 비교하여 원소들의 함량 변화는 보이지만 전체적인 함량비는 거의 유사한 형태를 보였으며, SiO₂ 함량비는 암석에서의 함량비보다 세 지역 모두에서 낮고, Na₂O는 높았으

며, Gr지역과 Tf지역에서 Fe₂O₃, MgO, TiO₂, MnO는 암석보다 높고, Ggn지역에서는 거의 같은 함량비를, Al₂O₃와 SiO₂는 암석에서와 마찬가지로 총 함량비의 80%를 차지하는 유사성을 보였다. 주성분원소들의 상호 변화 경향을 알아보기 위하여 주성분원소 가운데 풍화 및 변성 작용에 안정한 Al₂O₃(Hendricks and Whitting, 1968)의 함량에 따른 주성분 원소의 변화를 그렸다(Fig. 4).

그 결과, Al₂O₃의 함량이 증가함에 따라 Fe₂O₃, MgO, K₂O, TiO₂는 정(+)의 상관관계를 보이고, SiO₂, CaO, Na₂O, MgO, P₂O₅는 특별한 관계를 보이지 않았다. 일반적으로 암석에서 Al₂O₃와 부(-)의 상관관계를 보이는 주성분원소들이 연구지역의 하상퇴적물 시료에서는 뚜렷한 상관관계를 나타내지 않았고, 오히려 Fe₂O₃, MgO, TiO₂가 높은 상관성을 갖는 것으로 나타났다. 이러한 원인은 모암 중의 초기 함량비와 풍화, 운반 및 퇴적의 과정에서 특성 원소의 이동성(mobility)과 잔류 등의 복합적인 원인에 의한 것으로 사료된다.

4.2.2 희토류 및 독성원소

희토류원소는 암석학적 또는 광물들의 분결 과정에 따라 서로 다른 거동을 가지므로 지각 또는 맨틀의 부분용융, 분별작용 및 마그마의 혼화와 같은 과정을 포함하는 화성암의 분화 과정을 밝히는데 매우 중요하게 이용되고(Henderson, 1984), 독성원소는 하천의 잔류퇴적물에 존재하는 점토, 유기물 및 산화물에 흡착되거나 침전되어 동식물과 인간에게 잠재적인 독성원으로 작

용해(Thornton, 1983), 지구화학적 특성과 환경적 관점에서 매우 중요시된다. 하상퇴적물에 함유되어 있는 희토류원소와 독성원소에 대한 화학분석의 결과를 Table 3에 정리하였다.

희토류원소의 함량은 Gr지역이나 Tf지역이 Ggn지역보다 약간 높은 함량치를 나타낼 뿐 전반적으로 세 지역에서 유사한 값을 가졌다. 독성원소의 경우 As와 Cd는 지역과 시료의 채취 지점에 관계없이 검출한계 미만이었으며, Zn을 제외한 Cu, Ni, Pb, Co, Cr, Sb 함

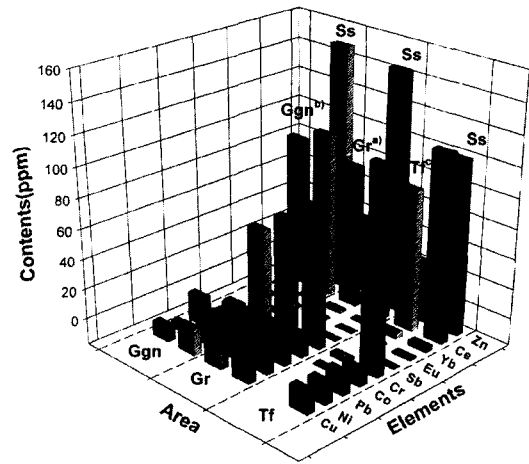


Fig. 5. The comparison of median values between stream sediments and rocks for rare earth and toxic elements in the Jangheung area (Ss: stream sediments, Gr^{a)}: the data of Turekian, K.K. and Wedepohl, K.H. (1961), Ggn^{b)}: the data of Cho (1992), Tf^{c)}: the data of Hildreth (1979)).

Table 3. Chemical compositions for rare earth and toxic elements of stream sediments in the Jangheung area.

Data (ppm)	Ce	Eu	Yb	As	Cu	Ni	Pb	Cd	Co	Cr	Sb	Zn	
No. of Samples	189	189	189	189	189	189	189	189	189	189	189	189	
Mean	Gr	121.44	1.46	3.52	<1	17.36	14.21	16.14	<1	10.92	61.74	0.42	169.09
	Ggn	101.00	1.44	2.92	<1	20.92	24.60	17.83	<1	15.02	90.46	0.52	155.36
	Tf	107.87	1.53	3.23	<1	14.88	14.19	14.58	<1	10.78	58.78	0.40	113.07
Min.	Gr	39.40	0.93	1.82	<1	7.70	7.10	11.00	<1	4.21	11.20	0.20	38.10
	Ggn	67.70	0.94	1.02	<1	8.90	8.50	12.00	<1	6.02	20.20	0.18	60.30
	Tf	64.80	0.76	1.22	<1	7.00	5.30	9.70	<1	4.71	17.70	0.15	39.40
Max.	Gr	215.00	1.98	6.01	<1	99.00	35.00	22.00	<1	22.20	148.00	2.80	863.00
	Ggn	191.00	2.41	6.24	<1	45.00	59.00	30.00	<1	29.30	169.00	3.56	1030.00
	Tf	185.00	2.61	5.63	<1	35.00	68.00	29.00	<1	30.00	170.00	1.97	1100.00
Std.dev.	Gr	32.93	0.27	0.88	<1	14.40	6.30	2.95	<1	3.99	28.93	0.46	156.20
	Ggn	24.66	0.32	0.90	<1	7.89	11.39	3.05	<1	4.86	37.33	0.62	168.00
	Tf	25.37	0.38	0.77	<1	5.61	10.07	2.33	<1	4.39	30.31	0.39	108.27

<1: not detected.

Abbreviations are same as Table. 2.

량은 Ggn지역>Gr지역>Tf지역 순 이었다(Fig. 5). Fig. 5에서 희토류원소 함량치는 암석과 비교하여 각각 원소들의 함량 변화는 나타났으나, 전체적인 함량비는 전반적으로 유사한 형태를 보였고, Gr지역의 암석함량치는 Ggn지역이나 Tf지역보다 적음에도 불구하고 하상퇴적물 시료에서 그 함량이 더 높게 나타나는 특이한 분산양상을 보이는데, 이는 암석의 풍화시 희토류원소의 이동성에 대한 유체의 화학적 성질과 암층 등의 절리를 따라 유입된 물에 의해 풍화가 일어나고, 희토류원소의 변질 정도가 심한 암석에서 점진적으로 증가하는 경향(Nesbitt, 1979)등의 원인이 복합적으로 작용했기 때문으로 사료된다. 이들 원소 중 Cu와 Zn의 값이 특히 높은 값을 보이는 지역이 관찰되는데, 이들 시료는 원기 연광산(장기홍과 김기태, 1967)이 있었던 지역(JH-132, JH-133, JH-134)과 금사리 금광산(장기홍과 김기태, 1967)이 있었던 지역(JH-82, JH-85, JH-86, JH-87, JH-88, JH-89)이었다. 이들 시료에 대해 상부의 2차적인 오염원 등의 존재 유무를 살펴본 결과 특이한 요인을 찾을 수 없어, 이것은 자연적인 부화에 의한 영향인 것으로 사료되었다. 하상퇴적물의 독성원

소 함량이 암석의 함량보다 높고, Zn이나 Cu의 농도가 다른 원소의 농도에 비해 전체적으로 높은 이유는 퇴적물내의 미량원소 농도가 Fe>Zn>Cr>Cu>Pb>As 순이며(문지원 등, 2000), 원소들의 상대적인 이동도는 Mn>Cd>Zn>Pb>Fe(이평구와 이재호, 1999)라는 기존의 연구결과와 관련지어 볼 때 연구지역 하상퇴적물에서 Zn이나 Cu가 높은 함량치를 보이는 시료들은 광상의 발달과 원소들의 상대적인 이동도 등이 복합적으로 작용하였기 때문 인 것으로 사료된다.

Fig. 6은 희토류원소와 독성원소의 함량 변화를 도시한 것이다. 일반적으로 사질퇴적물 속에는 희토류원소가 적게 함유되어 있어 SiO₂의 함량이 높아질수록 희토류원소의 함량은 감소(이찬희 등, 1999)하게 되나, 연구지역의 Ce, Eu, Yb는 모두 아무런 관계를 보이지 않았으며, 독성원소의 경우 Cu의 함량이 증가함에 따라 Ni, Co, Cr은 정(+)의 상관관계를 나타내고, Pb, Sb, Zn은 분산된 형태를 나타냈다. 독성원소의 분산특성은 주성분원소 함량이 낮은 지점의 수계에서 높은 함량 분포를 나타내며, 이는 독성원소가 다른 원소에 비해 이동도가 크고 pH변화와 흡착작용 등에 의한 원소

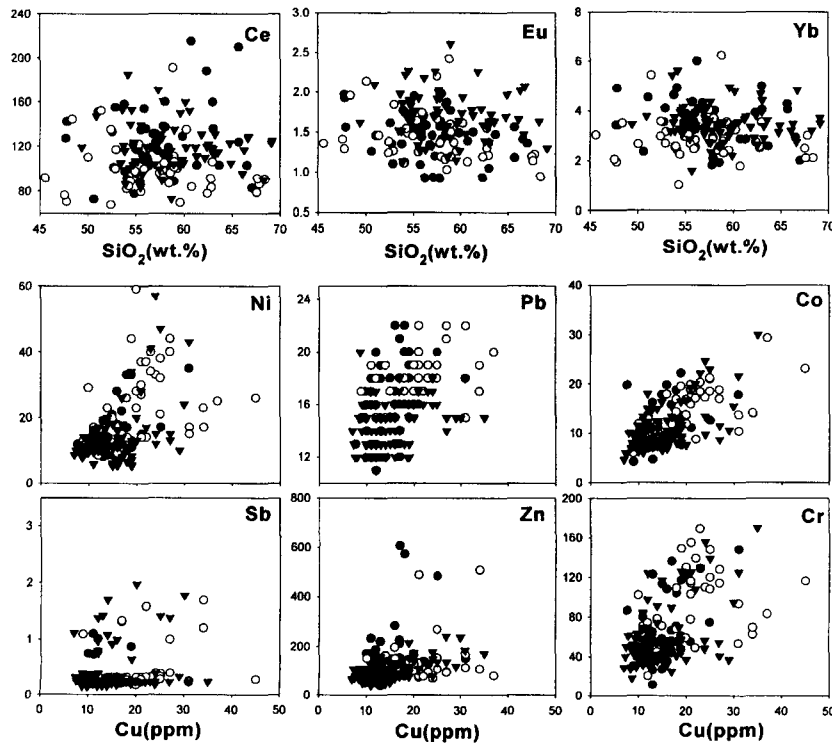


Fig. 6. Selected variation diagrams of rare earth elements versus SiO₂ and toxic elements versus Cu for stream sediments in the Jangheung area (symbols are same as Fig. 4).

Table 4. Chemical compositions minor elements of stream sediments in the Jangheung area.

Data (ppm)	Ba	Be	Bi	Mo	Nb	Sr	V	Zr	Li	Cs	Hf	Rb	Sc	Pa	
No. of Samples	189	173	189	189	189	189	189	189	189	189	189	189	189	189	
Mean	Gr	995.0	2.0	<1	<1	23.7	158.6	47.0	80.3	32.8	6.3	10.5	133.2	13.0	19.0
	Ggn	1050.0	2.2	<1	<1	19.0	147.3	58.7	65.8	43.9	7.4	9.5	133.6	13.8	17.1
	Tf	998.0	1.8	<1	<1	18.4	154.8	49.5	85.0	34.5	6.7	9.1	123.1	12.7	16.1
Min.	Gr	600.0	1.1	<1	<1	14.0	63.0	22.0	42.0	21.0	2.0	4.9	57.8	6.9	6.1
	Ggn	720.0	1.2	<1	<1	11.0	79.0	31.0	25.0	23.0	3.6	4.95	78.5	7.1	11.1
	Tf	700.0	1.0	<1	<1	12.0	54.0	22.0	49.0	20.0	2.5	5.7	64.3	7.0	10.0
Max.	Gr	1400.0	3.8	<1	<1	232.0	336.0	104.0	169.0	58.0	11.2	20.7	218.0	21.7	26.3
	Ggn	1500.0	3.8	<1	<1	28.0	275.0	84.0	143.0	93.0	13.6	29.6	188.0	19.2	34.4
	Tf	1500.0	4.1	<1	<1	27.0	462.0	374.0	133.0	62.0	20.0	15.0	221.0	25.9	31.8
Std.dev.	Gr	202.0	0.8	<1	<1	30.1	65.9	16.3	29.8	8.2	1.8	2.8	27.9	3.1	4.4
	Ggn	193.3	0.6	<1	<1	3.0	42.3	15.0	21.0	13.8	2.47	4.4	26.7	3.6	4.8
	Tf	151.8	0.8	<1	<1	2.8	56.6	36.0	16.0	7.9	2.4	1.8	26.4	3.8	3.8

Abbreviations are same as Table. 2.

의 농집 가능성이 크다는 것을 의미한다.

4.2.3 그 외의 미량원소

하상퇴적물의 미량원소 중에서 희토류원소와 독성원소를 제외한 나머지 미량원소에 대한 화학분석 결과를 Table 4에 정리하였다.

각 그룹별 미량원소에 대한 함량의 차이는 10%내외로 미소한 차이를 보였고 Bi와 Mo는 검출한계 미만이었으며, 대부분의 원소는 Ggn지역>Tf지역>Gr지역 순으로 함유량이 많았고, 원소에 대한 변화 양상도 거의 모든 원소에서 유사하게 나타났다. 이는 기반암에서 하상퇴적물로 진화되는 과정에서 원소들의 함량 변화량과 존재량의 비율이 지역에 관계없이 일정하게 유지되고 있으며, 부화나 결핍 등의 현상이 적게 작용하고 있는 것으로 생각할 수 있고, 각 지역별로 원소의 함량 차이가 2차적인 분산이나 거동특성 보다는 연구지역을 구성하고 있는 기반암의 영향이 크게 작용하여 나타난 현상이라고 추정할 수 있다.

JH-118시료와 JH-148시료는 다른 지역에 비해 10배나 높은 Nb함량과 V함량이 각각 검출되었다. 이러한 높은 함량에 대해 독성원소와는 달리 특정 금, 은, 연광산 등이 존재하지 않았으며, 채취 지점 주변에 이상 광화대나 2차 오염원과 같은 요인을 파악하지는 못하였으나, 이상이 나타난 지점에 대해 다른 원소의 함량을 비교, 검토한 결과 이상농집이나 결핍 현상 등이 발견되지 않는 것으로 보아 채취 시료 속에 특정 원소가 많이 포함된 광물이 존재 할 것으로 여겨진다.

일부 미량원소에 대한 3D bar chart를 Fig. 7에 나

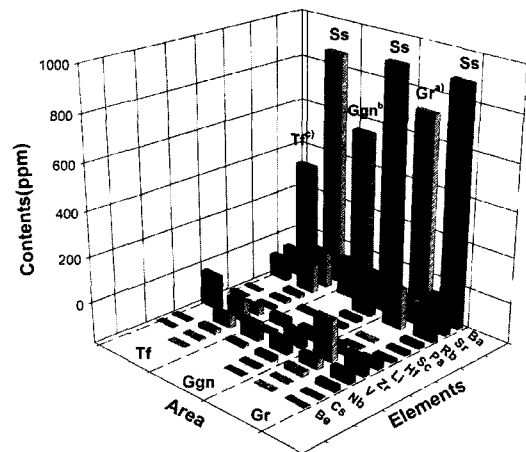


Fig. 7. The comparison of median values between stream sediments and rocks for minor elements in the Jangheung area (Ss: stream sediments, Gr^a: the data of Turekian, K.K. and Wedepohl, K.H. (1961), Ggn^b: the data of Cho (1992), Tf^c: the data of Hildreth (1979)).

타내었다. Ba나 Zr을 제외하고는 암종에 관계없이 비슷한 함량비를 보이며 암석에서보다 높은 함량을 보이지만 Zr은 원래 암석종의 함량보다 낮은 함량치를 나타내었다. 그러나 이러한 암석의 분석치와의 비교는 연구지역의 모암시료를 직접채취하여 분석한 값이 아니므로 비교, 고찰에 있어서 정확한 원인을 제시할 수는 없었다.

Al₂O₃ 함량에 따른 일부미량원소의 관계를 Fig. 8에 도시하였다. Ba, V, Li, Rb, Sc, Pa는 Al₂O₃와 정(+)의 상관관계 형태를 보이고, Nb, Be, Sr, Zr, Hf 등은

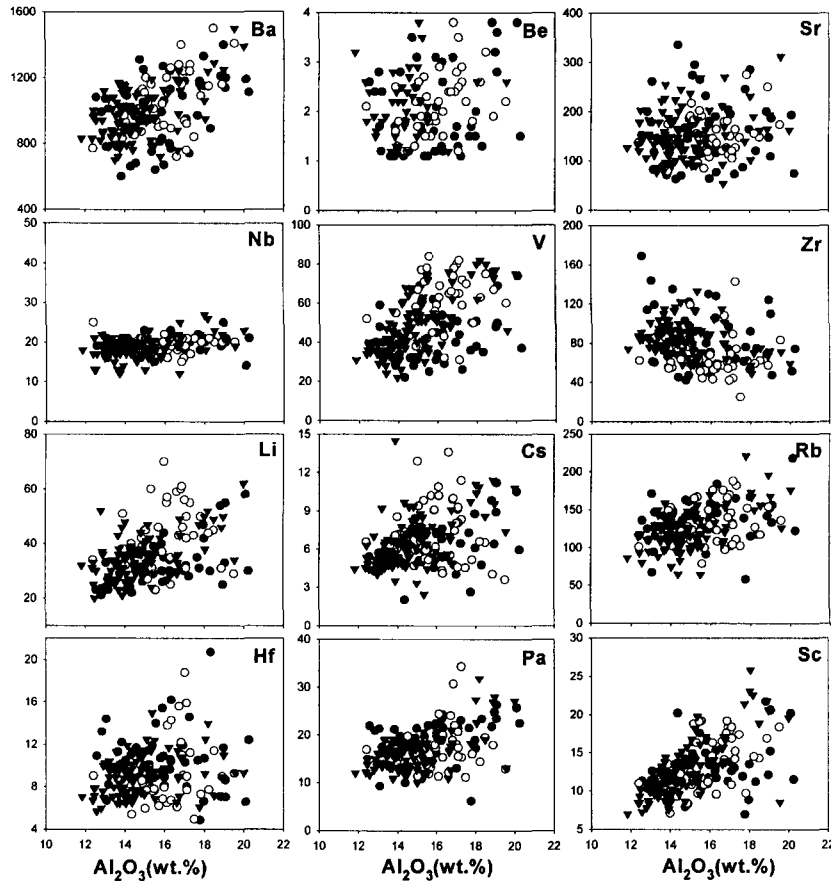


Fig. 8. Variation diagrams of minor elements versus Al_2O_3 in stream sediments samples (symbols are same as Fig. 4).

거의 불규칙한 분산된 형태를 나타낼 뿐 상관성은 보이지 않았다. 이는 주성분원소에서 나타난 특징과 유사한 것이며, 하상퇴적물내에서 원소들의 상관성과 거동 특성은 풍화작용의 영향으로 암석에서의 거동특성과 상당한 차이가 있는 것을 알 수 있었다.

Ba, Be, Nb, V, Cs, Rb, Sc, Pa는 제암산 일대의 편마암류 지역과 천관산 주변부의 화강암류 지역에서 높은 함량 분포를 나타내는데, 이는 광물학적인 수반 관계, 지역적인 풍화나 수계 발달 정도 등과 관련된 원소의 분포 양상으로 사료된다.

4.2.4 원소들의 거동 및 부화

암석에서 일차적으로 분산된 원소는 모암의 풍화 작용에 의해 형성되는 토양이나 표사 등에 재분포되며 풍화산물이 운반, 퇴적될 때 기계적, 화학적 요인에 의해 자연수와 같은 새로운 모체에 재분포 되기도 하며 분산정도는 원소의 지구화학적 환경에 따른 이동도에

의해 분산 양상이 달라진다(전효택 등, 1998). 일반적으로 이동도가 좋은 원소는 암석 주변에 넓게 분산되고 이동도가 낮은 원소는 암석 주변에 정체되거나 이차산화물에 흡착되어 부분적으로 이동한다(Rose *et al.*, 1979). 지표 환경에 존재하는 원소들은 그 유해 여부가 불분명하나 일부 원소의 경우 강한 잠재적 독성이 있어 이들 원소들이 분산, 거동하면서 암석과 퇴적물, 토양 및 순환수를 따라 이동하고 각각 환경계의 자정 능력을 초과할 때 유해한 물질이 부화되어 생태계에 영향을 미칠 수 있고(Davies and Ballinger, 1990; Schuiling, 1990), 대부분 높은 산화-환원 전위를 가지며 자연수에 쉽게 용해되어 수용액 상태로 존재할 수 있기 때문에(Davies and Ballinger, 1990; Fuge *et al.*, 1989; Levy *et al.*, 1992), 이동 거리도 길고 오염의 확산효과도 탁월하다. 그러므로 각 원소의 오염 정도를 보다 효과적으로 파악하기 위해서 부화(enrichment)라는 개념을 도입하여야 한다.

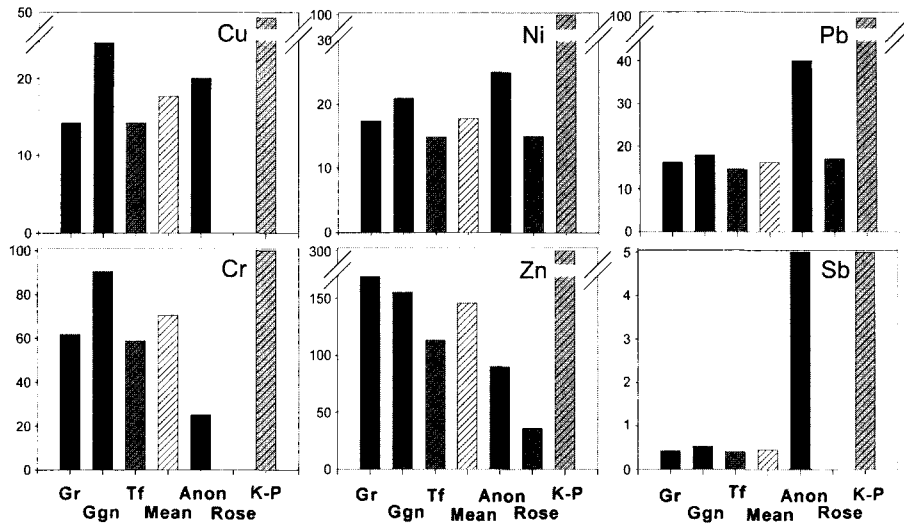


Fig. 9. Comparison diagrams of toxic elements contents between stream sediments of each area and world guideline in the Jangheung area (abbreviations: Gr; Granite, Ggn; Granite gneiss, Tf; Tuff, Anon; Anon (1977), Rose; Rose. *et al.* (1979), K-P; Kabata-Pendias and Pendias (1984)).

이를 위해 연구 지역 지질도상의 모암과 같은 종류의 암석 분석치와 독성원소들에 대한 지역별 평균치, 세 지역의 함량치를 합산한 평균치, Anon(1977)이 제시한 토양 및 퇴적물의 평균치, Rose *et al.* (1979)가 제시한 토양평균치, Kabata-Pendias and Pendias (1984)의 토양 및 퇴적물에서 tolerable level을 이용하여 비교하여 보았다(Fig. 9).

Fig. 9에서 Cu는 세 지역 모두 Rose *et al.* (1979)가 제시한 15 ppm보다 높고, Anon(1977)이 제시한 25 ppm, Kabata-Pendias and Pendias(1984)의 100 ppm 보다는 낮은 값을 나타냈다. Ni는 Ggn지역에서 Gr지역이나 Tf지역에 비해 1.5배 정도 높게 나타났고, Anon(1977)이 제시한 20 ppm보다 조금 높게 나타났으나 Gr지역과 Tf지역에서는 기준치 보다 낮게 나타났다.

Cr은 Ggn지역에서 Gr지역이나 Tf지역보다 낮게 나타났고, Sb는 세 지역 모두에서 Anon(1977)과 Kabata-Pendias and Pendias(1984)가 제시한 5 ppm에 훨씬 못미치는 0.5 ppm 미만으로 다른 원소에 비해서도 함량비가 낮게 나타났다.

Zn은 세 지역 모두에서 Anon(1977), Rose *et al.* (1979)이 제시한 값보다 높게 나타나나, Kabata-Pendias and Pendias(1984)가 제시한 300 ppm에는 못 미치는 값이었다.

일반적으로 퇴적물내의 중금속 함량은 퇴적물의 입도와 중금속 흡착력이 큰 유기물이나 산화물의 영향을

받는 것으로 알려져 있어(Adriano, 1986; Horowitz, 1991), 이러한 영향도 다소 작용한 것으로 사료된다.

Sb는 세 지역 모두에서 Anon(1977)과 Kabata-Pendias and Pendias(1984)가 제시한 5 ppm에 훨씬 못 미치는 0.5 ppm미만의 값으로 다른 원소에 비해 상대적인 함량비가 낮게 나타났다.

부화는 단일 원소에 의한 현상이라기 보다는 여러 원소들의 상호작용에 의해 복합적으로 일어나는 것이기 때문에 연구지역 하상퇴적물의 분석치를 주성분원소, 미량원소, 희토류원소 및 독성원소로 나누고, 이를 다시 지질집단별로 세 지역으로 분류하고 부화계수를 산출하였다. Gr지역 하상퇴적물의 주성분원소는 calc-alkalic granite(Nockolks and Allen, 1954)의 평균조성치를, 그리고 미량성분, 희토류원소, 독성원소는 Low Ca-granite(Turekian and Wedepohl, 1961)의 평균조성치를 이용하였다. Ggn지역 하상퇴적물은 주성분, 미량성분, 희토류와 독성원소를 모두 남원화강암질편마암(조규성, 1992)의 분석치를, Tf지역 하상퇴적물은 주성분, 미량성분, 희토류 및 독성원소를 Bishop Tuff(Hildreth, 1979)의 평균조성치를 이용하여 부화계수를 구하였으며, 독성원소에 대해서는 Anon(1977), Rose. *et al.*(1979)와 Kabata-Pendias and Pendias(1984)의 경우를 이용하여 보다 많은 비교 분석을 실시하였다(Fig. 10).

주성분원소의 부화계수는 Gr지역, Ggn지역, Tf지역

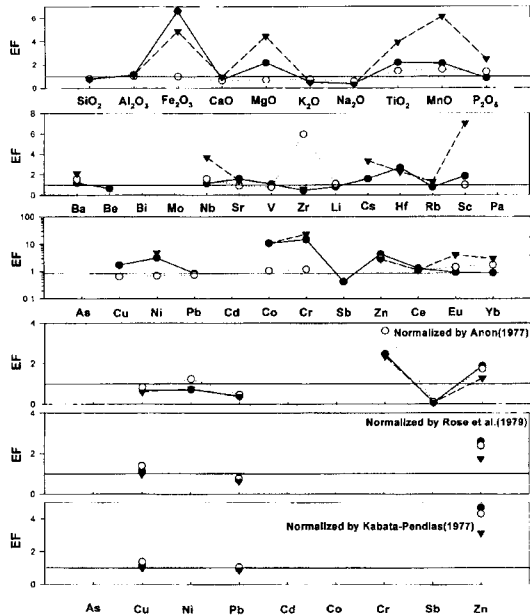


Fig. 10. Enrichment factor diagrams of major, minor, rare and toxic elements (mean value) in stream sediments normalizing by host rock (symbols are same as Fig. 4).

모두 Fe₂O₃, MgO, TiO₂, MnO가 많이 부화되는 특성을 보이고 있으며, 미량원소에서 Ba, Nb, V, Li, Rb는 거의 부화 정도가 보이지 않았다. 희토류원소는 일반적으로 암석에 비해 퇴적물에 높게 부화되어 나타나나, Ggn지역에서 Eu와 Yb원소의 부화가 높게 나타났을 뿐, Gr지역과 Tf지역에서는 원소들의 뚜렷한 부화는 없었다. 독성원소에서 Anon(1977)에 의한 부화 특성은 Zn의 부화가 세 지역에서 모두 높게 나타났고, Rose et al. (1979)에 의한 부화계수 특성은 Zn를 제외하고는 특별한 부화 특성은 나타나지 않았으며, Kabata-

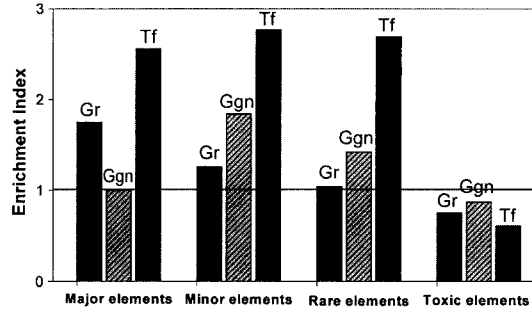


Fig. 11. Enrichment index diagrams of major, minor, rare and toxic elements of stream sediments in the Jangheung area.

Pendias and Pendias(1984)에 의한 부화 특성은 모든 원소에서 나타나지 않았다. 이처럼 부화경향이 알려진 것과 다르게 지질집단에 따라 특이한 경향을 보이는 것은 이동도나 원소 상호간의 거동양상, 모암의 함량변화, 풍화정도 및 지역적인 광화작용 등의 요인들이 복합적으로 작용하여 나타난 것으로 보인다.

부화지수(enrichment index; EI)는 다변수 자료를 단순화시키기 위한 방법(Nimick and Moore, 1991)으로 각 시료의 분석치를 주성분원소, 미량원소, 독성원소, 희토류원소로 표준화하여 산술평균치로 하였고 (Table 5), 부화지수가 1 이상인 경우는 부화(오염)지역, 1이하인 경우는 정상(비오염)지역으로 나눌 수 있다. 그러나 채취 시료의 위치에 따라 기계적, 화학적 풍화 정도와 퇴적물의 침전 속도가 다르기 때문에 광물 조성과 화학 조성에는 다소 편차가 있을 수 있다. Fig. 11은 각 원소에 대해 지역별 부화지수를 구하여 도시한 그림이다.

주성분원소의 경우 Tf지역과 Gr지역이 조금 높게 나

Table 5. Enrichment index (E.I.) of stream sediments in the Jangheung area.

Area	Enrichment index normalized by composition of						
	host rock				Anon	Rose	K-P
	major	minor	rare	toxic	toxic ¹⁾	toxic ²⁾	toxic ³⁾
Gr	1.75 ^{a)}	1.26 ^{b)}	1.04 ^{b)}	5.21	0.75	2.27	0.31
Ggn	1.00 ^{c)}	1.84 ^{c)}	1.42 ^{c)}	1.22	0.87	2.25	0.40
Tf	2.56 ^{d)}	2.77 ^{d)}	2.69 ^{d)}	10.52	0.61	1.66	0.27

^{a)}Turekian, K.K. and K.H. Wedepohl, 1961.

^{b)}Nockolds, S.R. and Allen, R. 1954.

^{c)}Cho, 1992.

^{d)}Hildreth, 1977.

¹⁾Anon (1977), for Cu, Ni, Pb, Sb, Zn.

²⁾Rose et al. (1979), for Cu, Pb, Zn.

³⁾Kabata-Pendias and Pendias(1984), for Cu, Ni, Pb, Cr, Sb, Zn.

타났고, Ggn 지역은 부화되지 않은 것으로 나타났으며, 미량원소와 희토류원소는 Tf지역>Ggn지역>Gr지역 순으로 부화지수가 높게 나타났고, 독성원소는 세 지역 모두에서 낮은 부화지수를 나타냈다. 이러한 부화지수는 일반적으로 모든 원소 그룹에 대해 Tf지역에서 가장 높게 나타났으며, Gr지역과 Ggn지역은 거의 비슷한 부화지수를 나타냈다.

5. 결 론

1. 장흥지역 1차 수계(일부 2차수계) 하천수의 pH는 1999년에 6.51~7.82, 2001년에 5.53~7.72로 약산성내지 중성환경을, 전기전도도는 1999년에 6.74~160.2($\mu\text{s}/\text{cm}$), 2001년에 14.40~159.60($\mu\text{s}/\text{cm}$)로, 몇 개의 시료를 제외하고 모두 오염되지 않은 하천수의 특성을 지시하였으며, 계절적, 시간적 변화는 적게 나타났다.

2. 하상퇴적물 시료를 화강암류지역(Gr지역), 화강암질편마암류(일부 변성퇴적암류 포함)지역(Ggn지역), 응회암류지역(Tf지역)의 세 지질집단으로 분류하고 주성분원소에 대하여 고찰해 본 결과, SiO_2 함량비는 암석에서의 함량비보다 세 지역 모두에서 낮았고, Na_2O 는 높았으며, 화강암류지역(Gr지역)과 응회암류지역(Tf지역)에서 Fe_2O_3 , MgO , TiO_2 , MnO 는 암석보다 높고, 화강암질편마암류(일부 변성퇴적암류 포함)지역(Ggn지역)에서는 거의 같은 함량비를 보였으며, Al_2O_3 에 대하여 Fe_2O_3 , MgO , TiO_2 는 높은 상관성을 보였다.

3. 희토류원소의 함량은 화강암류지역(Gr지역)이나 응회암류지역(Tf지역)이 화강암질편마암류(일부 변성퇴적암류 포함)지역(Ggn지역)보다 약간 높은 함량치를 나타낼 뿐 전반적으로 세 지역에서 유사한 값을 가졌으며, 독성원소의 경우 As와 Cd는 지역과 시료의 채취지점에 관계없이 검출한계 미만이었으며, Zn와 Cu는 부분적으로 매우 높은 함량치를 나타냈는데 이들 지역은 금광상과 연광상의 존재로 인한 영향으로 판단되었다.

4. 그 외의 미량원소에서 Bi와 Mo는 검출한계 미만이었으며, 대부분 원소는 화강암질편마암류(일부 변성퇴적암류 포함)지역(Ggn지역)>응회암류지역(Tf지역)> 화강암류지역(Gr지역) 순으로 함유량이 많았고, 원소에 대한 변화양상도 거의 모든 원소에서 유사하게 나타났다.

5. 부화계수는 주성분원소에서는 Fe_2O_3 , MgO , TiO_2 , MnO 가, 독성원소에서는 Co, Cr, Zn가 세 지역 모두에서 높았으며, 희토류원소에서는 화강암질편마암류(일부 변성퇴적암류 포함)지역(Ggn지역)의 Eu, Yb가 높은 값을 나타냈다.

6. 부화지수는 주성분원소, 미량원소, 희토류원소 모두에서 응회암류지역(Tf지역)에서 높게 나타났으며, 화강암류지역(Gr지역)과 화강암질편마암류(일부 변성퇴적암류 포함)지역(Ggn지역)은 거의 비슷한 부화지수를 나타냈다.

7. 장흥지역 1차수계(일부 2차수계) 하상퇴적물에 대한 화학분석을 통한 주성분원소, 미량원소, 희토류 및 독성원소 등의 특성을 파악한 결과 이상치를 갖는 시료 몇 개를 제외한 나머지 하상퇴적물 시료는 앞으로 이 지역에서 일어날 수 있는 지화학적 재해의 판단기준이 되는 자연배경값으로의 좋은 자료가 될 것이다.

사 사

본 논문의 원고를 읽고, 건설적인 비평과 조언을 해주신 전북대학교 오창환 교수님과 세명대학교 정명채 교수님께 감사를 드립니다.

참고문헌

- 김용준, 박봉순 (1980) 한반도 지진지체구조 분석에 관한 연구. 과학기술처, p. 1-159.
- 김용준, 오민수, 박재봉 (1993) 나주-해남지역에 분포하는 화성암류의 암석화학. 한국지구과학회지, 24권, p. 300-315.
- 김용준, 오민수, 강상원 (1994) 해남-강진 지역에 분포하는 화성암류에 대한 암석화학적 연구. 한국지구과학회지, 15권, p. 341-355.
- 문지원, 이상훈, 문희수 (2000) 안양천 바닥 퇴적물의 지구화학적 특성에 따른 하천수 오염영향. 자원환경지질, 33권, p. 205-215.
- 이평구, 이재호 (1999) 도로변 토양의 오염 특성과 Pb, Zn, Cd 및 Mn의 침출 거동에 미치는 pH와 반응시간의 영향. 자원환경지질, 32권, p. 53-62.
- 이찬희, 이현구, 유봉철, 조애란 (1998) 삼광 금-은광산 일대의 하상퇴적물과 토양내 함유된 환경적 독성원소의 지구화학적 부화와 이동. 자원환경지질, 31권, p. 111-125.
- 장기홍, 김기태 (1967) 강진도폭 및 설명서. 국립지질연구소, p. 1-15.
- 전효택, 문희수, 김규한, 정명채 (1998) 환경지질학. 서울대학교출판사, p. 355-422.
- 조규성 (1992) 소백산육괴 편마암류의 기원에 대한 지화학적 연구. 전북대학교 박사학위 논문, p. 134-142.
- 주승환, 지세정 (1990) 광주화강암의 Rb-Sr 연령측정 연구. 한국동력자원연구소, KR-90-1B-2, p. 3-54.
- 최유구, 윤형대 (1968) 장흥도폭 및 설명서. 국립지질연구소, p. 1-15.
- Adriano, D.C. (1986) Trace elements in the terrestrial environment. Springer-Verlag, 533p.
- Anon, J. (1977) Ecological evaluation of proposed discharge of dredged or fill material into navigable water. Interim Guidance for Implementation of Section 404 (b) of Public Law, p. 92-500.

- Cullers, R.L. (1988) Mineralogical and chemical changes of soils and stream sediments formed by intense weathering of the Danburg granite. Georgia, U.S.A., *Lithos*, v. 21, p. 301-314.
- Cullers, R.L., Barrentt T., Calson R., and Robinson B. (1983) Rare-earth element and mineralogic changed in Holocene soil and stream sediments: a case study in the Wet Mountains Colorado, U.S.A.. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 63, p. 275-297
- Davis, B.D. and Ballinger, R.C. (1990) Heavy metals in soils in north Somerset, England, with special reference to contamination from base metal mining in the Mendips. *Environmental Geochemistry and Health*, v. 12, p. 291-300.
- Fuge, R., Paveley, C.F., and Holdham, M.T. (1989) Heavy metal contamination in the Tanat valley, North Wales. *Environmental Geochemistry and Health*, v. 11, p. 127-135.
- Henderson, P. (1984) Rare earth elements geochemistry. *Elsvier Science Publish Co. Inc.*, 510p.
- Hendricks, D.M. and Whittig, L.D. (1968) Andesite weathering (2) Geological Survey from andesite to saprolite. *Journal of Soil Science*, v. 19, p. 146-153.
- Hildreth, E.W. (1979) The Bishop tuff: Evidence for the origin of compositional zoning in silicic magma chambers. *Geological Society of America Special Paper* 180, p. 43-75.
- Horowitz A.J. (1991) A primer on sediment-trace element chemistry. *Lewis Publishers*. p. 136.
- Kabata-Pendias, A. and Pendias, H. (1984) Trace elements in soils and plants. *CRC Press Inc.*, 315p.
- Levy, D.B., Barbarick, K., Siemer, E.G., and Sommers, L.E. (1992) Distribution and partitioning of trace metals in contaminated soils near Leadville, Colorado. *Journal of Environmental Quality*, v. 21, p. 185-195.
- Nesbitt, H.W. (1997) Mobility and fraction of rare earth elements during weathering of granodiorite. *Nature*, v. 279, p. 206-210.
- Nimick, D.A. and Moore, J.N. (1991) Prediction of water-soluble metal concentrations in fluvially deposited tailings sediments, Upper Clark Fork Vally, Montana, U.S.A.. *Applied Geochemistry*, v. 6, p. 635-646.
- Nockolds, S.R. and Allen, R. (1954) The composition of some igneous rocks. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 65, p. 1007-1032.
- Rose, A.W., Hawkes, H.E., and Webb, J.S. (1979) Geochemistry in mineral Exploration. *Academic Press*, London, 657p.
- Schuiling, R.D. (1990) Geochemical engineering: some thoughts on a new research field. *Applied Geochemistry*, v. 5, p.251-262.
- Thornton, I. (1983) *Applied Environmental Geochemistry*. Academic Press, 501p.
- Turekian, K.K. and Wedepohl, K.H. (1961) Distribution of the elements in some major units of the Earth's crust. *Geol. Soc. Amer. bull.* 72, p. 175-192.

2002년 8월 19일 원고접수, 2002년 12월 6일 게재승인.