

광주광역시 하천의 표층퇴적물에 대한 지구화학적 특성과 오염

오강호^{1,*} · 김주용² · 고영구¹ · 윤석태¹ · 신상은² · 박배영² · 문병찬¹ · 김해경²

¹전남대학교 과학교육학부/과학교육연구소, 500-757 광주광역시 북구 용봉동 300

²전남대학교 지구환경과학부, 500-757 광주광역시 북구 용봉동 300

Geochemical Characteristics and Contamination of Surface Sediments in Streams of Gwangju City

Kang-Ho Oh^{1,*} · Joo-Yong Kim² · Young-Koo Koh¹ · Seok-Tai Youn¹ · Sang-Eun Shin² · Bae-Young Park² · Byoung-Chan Moon¹ · Hai-Gyoung Kim²

¹Department of Science Education/Institute of Science Education,
Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

²Department of Earth systems and Environmental Science,
Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

Abstract: In order to investigate the geochemical characteristics of surface sediments in streams of Gwangju City, sediment samples from the main stream of Yeongsan river, Hwangryong river, and Gwangjucheon in the city were collected and analyzed for grain size and metal and organic carbon contents. The sediment types of the streams widely vary from pebble to mud. The metal contents in the sediments from Yeongsan river and Hwangryong river are mainly dependent on the grain size of the sediments and the geology around the streams, while the sediments in Gwangjucheon are controlled by organic matter contents from the domestic sewage. The enrichment factor (EF) and index of geoaccumulation (Igeo) representing the degree of metal contamination in the sediments are relatively low in the main stream of Yeongsan river and Hwangryong river. However, those of Gwangjucheon show EF values of P=8.30, Cu=5.54, Zn=14.28 and Pb=7.41 and Igeo values of P=3.78, Cu=2.79, Zn=3.66 and Pb=1.59. The heavy metal contamination is especially significant near the area where the Seobangcheon and Donggyecheon branches of Gwanjucheon, join. Therefore, it is suggested that the metallic contaminations of these small streams are significantly influenced by the domestic sewage of the city.

Keywords: streams of Gwangju city, surface sediment, geochemical characteristics, enrichment factor(EF), index of geoaccumulation(Igeo)

요 약: 광주광역시 하천에 분포하는 표층퇴적물의 지구화학적 특성을 살펴보기 위하여 영산강 본류, 황룡강, 광주천에서 채취한 시료를 대상으로 입도, 금속원소, 유기탄소의 함량에 대한 분석을 실시하였다. 퇴적물의 입도는 잔자갈에서 니질 크기로 다양하게 나타났다. 퇴적물 내 금속원소의 함량변화는 영산강 본류와 황룡강에서는 퇴적물 입도와 주변 지질에 의한 의존성을 보였다. 광주천에서는 생활하수 등의 유기물에 의한 많은 영향을 받은 것으로 나타났다. 퇴적물에 함유된 금속원소들의 오염을 알아보기 위한 부화계수와 농집지수는 영산강 본류와 황룡강이 특별하게 오염되지 않음을 지시한다. 그러나 광주천에서는 부화계수가 P=8.30, Cu=5.54, Zn=14.28, Pb=7.41 등으로, 농집지수는 P=3.78, Cu=2.79, Zn=3.66, Pb=1.59 등을 보였다. 특히, 광주천의 지류인 서방천과 동계천 등이 유입되는 지점에서 중금속 오염이 상당히 진행된 것으로 보여진다. 따라서, 광주광역시를 관류하는 하천들의 금속오염은 상당 부분 도시지역의 생활 하수에서 비롯된 것으로 판단된다.

주요어: 광주광역시 하천, 표층퇴적물, 지구화학적 특성, 부화계수, 농집지수

*Corresponding author: yeongsanriver@hanmail.net

Tel: 82-62-530-2510

Fax: 82-62-530-2519

서론

대도시 인근의 하천은 인간 활동과 밀접한 관계를 이루고 있다. 특히 하천으로부터 유입되는 다양한 유해물질들은 수중생태계 및 하상에 퇴적되는 퇴적물을 오염시켜 수중 환경을 비롯한 전 지구적인 환경에 변화를 가져온다. 하천 오염에 대한 환경학적 연구들은 주로 수질을 주 대상으로 활발하게 진행되고 있다. 이러한 하천은 토양과 암석을 풍화·침식시켜 지형의 변화를 초래하여, 지표수와 지하수에 의해 오염물질을 이동시키기도 한다(옥치상 외, 1999; Berner and Berner, 1987). 하천환경을 전체적으로 이해하기 위해서는 수질뿐만 아니라 하상에 집적되는 퇴적물 내의 중금속들을 비롯한 지화학적 성분들의 거동(geochemical behavior)을 살피는 것이 중요하다(Thornton, 1983; Alloway *et al.*, 1988). 수질이 단기간에 걸친 하천환경의 특성변화를 반영한다면, 퇴적물에 함유되어 있는 중금속들은 하천수에 함유된 성분들에 비해 시간적 요인에 의한 변화가 적고 상대적 함량이 높아 하천환경의 지속적인 변화를 평가하는데 유용한 매개체로 간주된다(Thornton, 1983). 특히, 이 성분들은 퇴적물 내에 함유된 중금속의 존재형태와

물리·화학적 변화에 따라 하천수 중으로 재용출되거나 퇴적물 내에 침전될 가능성이 있기 때문에 하천환경에 대한 영향력이 크다(Alloway *et al.*, 1988).

국내에서 하상퇴적물에 대한 최근 연구는, 광산활동 등에 의한 탄광 주변 산성광산배수의 오염 정도를 파악하기 위해 활발히 진행되고 있으나(김경웅, 1997; 박천영 외, 2000; 2001; 오대균 외, 1995; 이찬희 외, 2001; 전효택 외, 1998; 전효택과 황지호, 1998), 대도시를 관류하는 하천을 대상으로 진행된 연구는 상대적으로 희소한 실정이다(김주용 외, 1999; 문지원 외, 2000; 이성은 외, 2002).

광주광역시는 지리적으로 영산강의 중상류에 위치하며, 본류를 비롯한 대지류인 황룡강과 광주천 등의 하천이 흐르고 있다(Fig. 1). 특히 광주시의 중심부를 관통하는 광주천은 수질이 악화되고 있으며, 영산강 하천환경에 대한 비교적 큰 영향을 미친다(전라남도, 1996). 영산강권역과 광주광역시에 대한 기존의 선행 연구로는, 광주·전남의 수자원 확보, 수질보존, 관리 및 개선 등에 관한 연구(건설교통부, 1999; 광주광역시, 1996; 전라남도, 1996; 정부합동, 2000), 수질환경에 관한 이화학적 연구(송재성, 1997; 위현정, 1997; 차진명 외, 1999; 윤희선, 2000; 송기판, 2001;

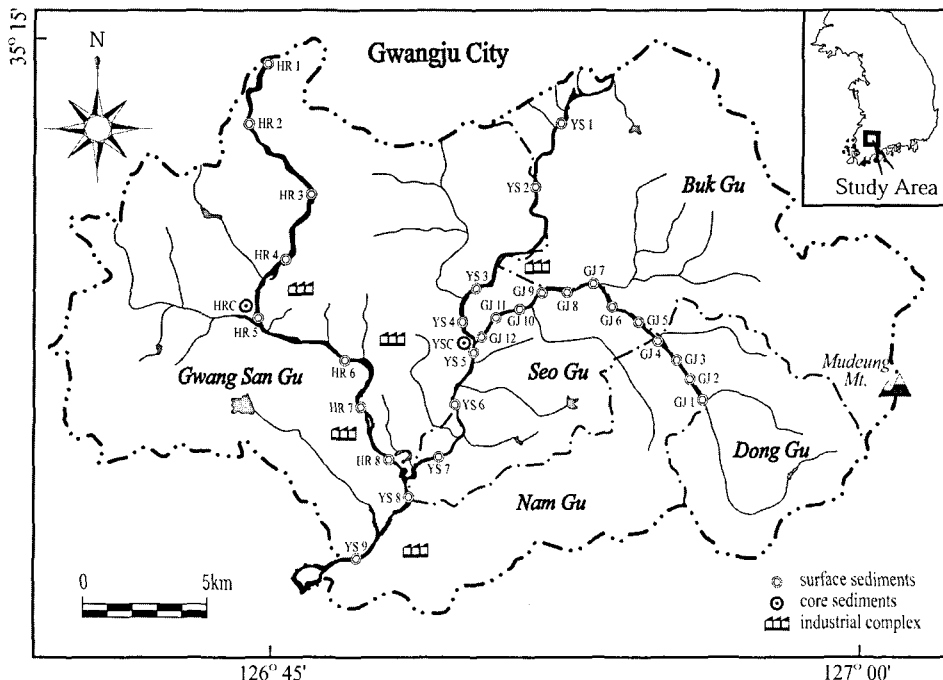


Fig. 1. Map showing the study area and sampling sites (YS: Yeongsan river sites, HR: Hwangryong river sites, GJ: Gwangju-cheon sites, YSC: Yeongsan river core site, HRC: Hwangryong river core site).

황대호, 2001) 등이 이루어진 바 있다. 그러나 퇴적 환경 및 하상퇴적물 중에 함유된 금속성분들의 지구 화학적 특성 및 오염에 관한 연구들은 상대적으로 저조한 실정이다(조영길과 김주용, 1998; 김주용 외, 1999; 2001). 따라서 본 연구에서는 영산강 중상류 수계에 위치한 광주광역시를 관류하는 하천들에서 채취된 퇴적물을 대상으로 오염물질의 지구화학적 특성과 거동을 규명하는 한편, 도시화 및 산업화에 따른 유해 중금속들의 오염실태와 그 오염원인에 대하여 해석을 시도하였다.

연구지역 개요

유역현황

우리나라 서남단에 위치하는 영산강은 전남·북의 경계를 이루며, 광주를 향해 서쪽으로 뻗어, 남해안의 서측까지 이르는 노령산맥을 중심으로 남남서 방향의 수지상 하계망을 형성하고 있다. 영산강은 유역면적 3,371km², 하천연장 1,472km, 본류의 유로연장 136km로서 연평균 2,588×10⁶m³의 물을 배수하는 우리나라 4대강 중의 하나로 황룡강, 광주천, 지석천, 고막원천, 함평천 등 5개 제 1지류들을 포함한다(수자원공사, 1992). 영산강 제 1지류인 황룡강은 장성군 북하면 신성리에서 발원하여 장성군과 광주광역시 광산구 전역을 관류하며, 남남동 방향으로 흘러 송정마을 앞에서 영산강과 합류한다. 황룡강은 직할하천 10.7km, 지방하천 34.4km를 포함한 유로연장 61.9km,

유역면적 547.34km²로 영산강 지류 중 가장 큰 규모이다. 광주천은 광주광역시 동구와 전남 화순군 경계인 장불재 서쪽에서 발원하여 광주광역시의 중심부를 관류하며 서남서방향으로 영산강과 합류한다. 광주천은 지방하천 11.8km를 포함한 유로연장 24.2km로 유역면적은 104.97km²이다. 광주천이 흐르는 지역에는 광주광역시 인구의 80% 이상이 밀집되어 거주하고 있으며, 영산강 유역에 분포하는 산업체 총 1,065개소 중 광주광역시에 전체의 71.5%인 762개소가 집중되어 있다(정부합동, 2000).

유역의 지질

연구지역인 광주광역시 부근의 지질은 선캄브리아기의 화강편마암류, 중생대의 화강암류, 퇴적암류, 화산암류, 신생대 제4기 충적층으로 구성되어 있다(Fig. 2). 선캄브리아기 화강편마암류는 이 지역에서 가장 고기의 지층으로 황룡강 중하류인 광산구 북부지역, 영산강 본류가 위치하는 광주광역시 북구 서북지역에 넓게 분포한다(김규봉 외, 1990; 박영석 외, 1995).

중생대 쥐라기 화강암류인 대보화강암에 대비되는 광주화강암은 흑운모화강암으로 광산구 남부지역과 서구, 남구, 북구 지역 대부분에 광역적으로 분포한다. 이 화강암류는 영산강 유역에서 큰 저반상 화강암으로 영산강 중류와 황룡강을 따라 폭 15~20km, 연장 40km 내외, 높이 100m 내외의 높은 구릉지를 형성한다. 그리고 이 화강암은 분포로 보아 영산강 중류 부근의 지형 형성에 가장 큰 영향을 미친 암체

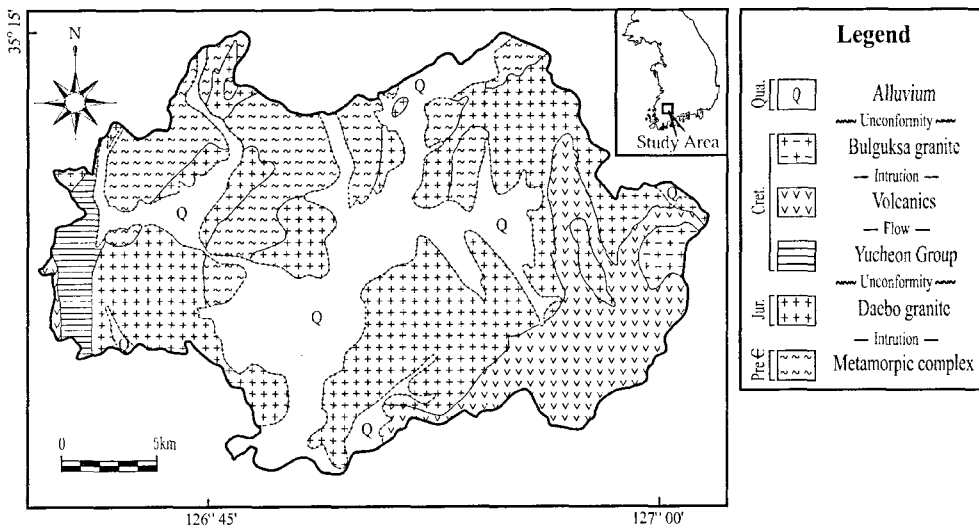


Fig. 2. Geological map around the study area (modified after; MOST, 1997).

로 보인다.

이후, 활발한 중생대 백악기 화산활동에 수반하여 이루어진 두꺼운 화산쇄설성 퇴적층과 안산암을 비롯한 화산암류들이 전기한 백악기 이전의 암층들을 부정합적으로 덮고 있다. 이들 화산쇄설성 퇴적암류들은 경상남북도 일원의 경상누층군의 유천층군에 대비되며 광산구 서측부에 주로 노출된다. 화산쇄설성 퇴적암류로는 응회암질 사암과 셰일 등이 부분적으로 협재되며 안산암과 유문암 등의 화산암류에 의해 피복된다. 전기한 이들 암층들은 같은 시기의 산성 및 중성맥암류에 의해 관입 당하고 있다. 하천의 유로를 따르는 측면부에는 충적층이 분포하고 있으며, 앞선 모든 암체들을 부정합으로 덮고 있다(과학기술부, 1997).

재료 및 방법

본 연구를 위하여 광주광역시를 관류하는 하천을 대상으로 전라남도 하천도와 1:50,000의 지형도를 참고하여, 영산강 본류, 황룡강, 광주천에서 총 29개의 하상퇴적물을 채취하였다. 이 때, 하상퇴적물의 채취 정점은 유로를 따라 약 3~4km 간격으로 채취하였으나, 인구밀집 지역인 광주천과 지류가 합류하는 본류의 상·하부에서는 1~2km 내외로 정하였다. 채취된 시료는 퇴적물에 대한 퇴적학 및 지구화학적 분석을 위한 시료로 구분한 후, 전 처리를 실시하였다. 특히 지구화학적 분석을 위한 시료들은 금속기기에 의한 오염을 최소화하기 위해, 플라스틱 삽을 이용하여 표층 3cm 이내의 퇴적물을 채취한 후, 약 1m 간격의 정방향으로 채취한 9개 부분시료를 합하여 하나의 완전시료로 사용하였다.

퇴적물의 입도분석은 시료를 20~30g 정도 취하여 과산화수소(H_2O_2)와 묽은 염산(HCl)으로 유기물과 탄산염을 제거한 후, Ingram(1971)과 Galehouse(1971)의 방법에 따라 건조기에서 충분히 건조시켜 사질과 니질 부분으로 분리하였다. 사질 퇴적물의 입도는 표준체를 이용한 건식체질(dry sieving) 방법을, 니질 퇴적물은 침전속도를 이용한 피펫법(pipetting method)으로 퇴적물의 입도별 함량을 구하였다. 퇴적물의 입도별 함량은 1 ϕ 간격으로 측정하여 중량비로 환산한 후, Folk and Ward(1957)에 의해 제안된 그래프 방법(graphic method)을 이용하여 조직매개변수들을 산출하였고, Folk(1968)에 의해 제시된 삼각도를 이용

하여 퇴적물의 유형을 분류하였다.

지구화학적 분석을 위한 표층퇴적물 시료는 70°C 이하로 건조기에서 충분히 건조시킨 후, 아게이트 모르타르(agate mortar)를 사용하여 200mesh 이하의 크기로 분말화 한 후, 주성분 원소, 미량원소 분석, 유기탄소 함량 시료로써 사용하였다. 지화학 분석은 영국 London 대학의 Royal Holloway and Bedford New College에 의뢰하여 주성분 원소인 Al, Fe, Mg, Ca, Na, K, Ti, P와 Mn 등 9종과 미량원소인 Ba, Co, Cr, Li, Nb, Ni, Sc, Sr, V, Y, Zn, Zr, Pb, Cd 등 14종의 총 23종의 원소를 분석하였다. 시료분석은 유도결합플라즈마방출분광기(ICP-AES)를 이용하였다. 원소의 분석시, 자료의 신뢰도를 검증하기 위해 미국 표준기술연구소(NIST)의 하상퇴적물 표준시료(RM 8704; buffalo river sediment)와 동일시료에 대한 중복분석을 실시하였다. 그 결과 정확도(표준시료에 대한 상대오차)는 표준시료의 오차 이내로 정밀도와 함께 $\pm 10\%$ 이내로 나타났다.

유기탄소의 함량분석을 위해서는 약 0.1g의 분말시료에 일정량의 중크롬산칼륨($K_2Cr_2O_7$)과 황산을 혼합한 산화제 용액을 과량으로 넣어 시료 중의 유기탄소를 산화시키고 남은 양을 황산암모늄제2철($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$)로 정량하는 역적정(back titration)으로 분석하였다(Strickland & Parsons, 1972). 이 때, 매 회 실험마다 분석치의 신뢰도 검증을 위해 분석시, 동일시료의 중복분석을 통하여 표준편차 $\pm 10\%$ 이내의 값만을 취하였다. 또한 공시료에 대한 중복분석을 실시하여, 표준변환율(Standard Conversion Factor)에 따른 유기탄소 함량을 보정하였다.

결과 및 토의

퇴적물 분포 및 퇴적상

연구지역에서 하상퇴적물의 입도분포를 보면, 전체적으로 역을 포함한 사질퇴적물이 우세하다. 하천 별 퇴적물들의 평균입도(M_z)는 영산강 본류에서 -2.08~3.05 ϕ , 황룡강에서는 -2.80~1.67 ϕ , 그리고 광주천에서는 -0.53~6.60 ϕ 의 범위로 잔자갈에서 니질 크기까지 다양하다. 이들 입도들의 평균은 0.98 ϕ 내외로 조립사(coarse sand)에 해당하며, 입도 변화는 전반적으로 단일모드적(unimodal)이다. 분급도는 본류에서 0.67~2.09 ϕ , 황룡강은 0.79~2.67 ϕ , 광주천은 0.78~4.38 ϕ 로 매우 불량한 분급(extremely poorly sorted)으로 나타

Table 1. Textural parameters of surface sediments in the study area.

	Gravel (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Mean (Mz; ϕ)	Sorting (σ ; ϕ)	Skewness (S_{ki})	Kurtosis (K_G)	Sediment type
YS 1	52.48	47.05	0.47	0.00	-1.43	1.69	-0.16	0.69	sG
YS 2	75.91	23.74	0.35	0.00	-2.08	1.55	0.39	0.96	sG
YS 3	35.11	64.36	0.32	0.21	-0.90	1.73	-0.38	0.99	sG
YS 4	0.32	97.79	1.24	0.65	1.65	0.77	-0.23	1.43	(g)S
YS 5	0.00	81.13	11.67	7.20	3.05	2.09	0.60	3.15	mS
YS 6	6.50	91.93	0.88	0.69	0.97	1.01	-0.23	1.32	gS
YS 7	13.01	79.46	4.74	2.79	0.93	1.92	0.08	1.41	gS
YS 8	5.96	91.61	1.39	1.04	0.18	0.73	-0.02	1.18	gS
YS 9	2.51	95.52	1.21	0.76	0.27	0.67	0.09	1.13	(g)S
Min.	0.00	23.74	0.32	0.00	-2.08	0.67	-0.38	0.69	-
Max.	75.91	97.79	11.67	7.20	3.05	2.09	0.60	3.15	-
Aver.	21.31	74.73	2.47	1.48	0.29	1.35	0.02	1.36	-
SD	27.19	25.20	3.70	2.30	1.59	0.56	0.32	0.71	-
HR 1	58.93	37.04	2.27	1.76	-1.67	2.51	0.48	0.77	G
HR 2	39.58	59.94	0.31	0.17	-0.65	1.40	-0.14	0.82	sG
HR 3	74.56	25.00	0.29	0.15	-2.15	1.54	0.22	0.86	sG
HR 4	8.44	87.46	2.84	1.26	1.12	1.56	0.02	0.91	msG
HR 5	13.11	86.26	0.50	0.13	-0.18	0.79	0.06	1.11	gS
HR 6	82.04	17.75	0.17	0.04	-2.80	1.63	0.63	1.14	gmS
HR 7	14.01	67.04	12.74	6.21	1.67	2.67	0.10	1.19	gmS
HR 8	6.95	83.26	6.38	3.41	1.20	1.78	0.19	1.70	gS
Min.	6.95	17.75	0.17	0.04	-2.80	0.79	-0.14	0.77	-
Max.	82.04	87.46	12.74	6.21	1.67	2.67	0.63	1.70	-
Aver.	37.20	57.97	3.19	1.64	-0.43	1.74	0.20	1.06	-
SD	31.04	28.13	4.40	2.18	1.68	0.60	0.25	0.30	-
GJ 1	15.28	83.01	0.99	0.72	0.03	1.03	-0.01	1.43	gS
GJ 2	25.28	30.11	31.09	13.52	2.77	4.38	-0.04	0.72	gM
GJ 3	0.00	43.40	41.09	15.51	4.85	2.72	0.25	0.97	sZ
GJ 4	0.00	10.53	62.38	27.09	6.47	2.33	0.26	0.87	sZ
GJ 5	7.34	77.13	8.92	6.61	1.75	2.14	0.26	1.49	gmS
GJ 6	32.39	64.56	1.86	1.19	-0.53	1.31	0.05	1.28	sG
GJ 7	0.00	17.28	47.15	35.57	6.60	2.68	0.00	0.88	sM
GJ 8	5.09	17.99	52.65	24.27	5.30	2.91	0.02	1.64	gM
GJ 9	3.32	94.57	1.24	0.87	0.80	0.78	-0.11	1.40	(g)S
GJ10	13.33	86.45	0.14	0.08	-0.05	0.85	-0.10	1.08	gS
GJ11	32.87	48.71	9.17	9.25	0.73	3.22	0.41	1.29	msG
GJ12	10.27	86.43	1.94	1.36	0.43	1.11	-0.19	2.73	gS
Min.	0.00	10.53	0.14	0.08	-0.53	0.78	-0.19	0.72	-
Max.	82.04	97.79	62.38	35.57	6.60	4.38	0.63	3.15	-
Aver.	12.10	55.01	21.55	11.34	2.43	2.12	0.07	1.32	-
SD	12.14	30.85	23.63	12.07	2.67	1.13	0.18	0.53	-

났다. 퇴적물의 왜도는 황룡강 퇴적물에서 전반적으로 양성왜도로 편향되며, 본류와 광주천에서는 매우 조립한 왜도(very coarse skewed)에서 세립한 왜도(fine skewed)에 이르는 광범위한 분포를 보였다 (Table 1).

연구지역 표층퇴적물의 유형을 구분하기 위해 입도

별 중량비를 구하여 Folk(1968)의 방법에 따라 삼각도에 도시하여 퇴적물들을 분류하였다(Fig. 3). 영산강 본류 퇴적물은 사질역(sG), 역질사(gS), 역함유사((g)S), 니질사(mS)의 4개 퇴적상으로 구분되었다. 황룡강에서는 역(G), 사질역(sG), 니사질역(msG), 역질사(gS), 역니질사(gmS)의 5개 퇴적상으로, 광주천에

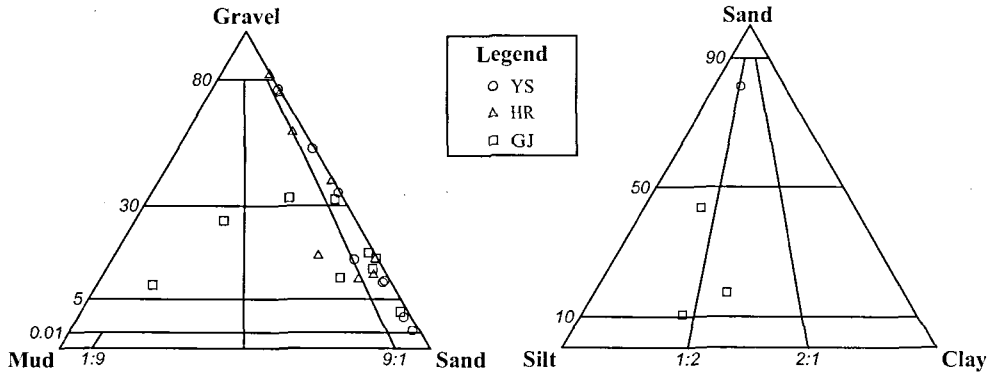


Fig. 3. Triangular diagrams showing sediment types.

서는 사질역(sG), 니사질역(msG), 역질사(gS), 역니질사(gmS), 역질니(gM), 역함유사((g)S), 사질실트(sZ), 사질니(sM)의 8개 퇴적상으로 구분되었다.

연구지역 표층퇴적물의 입도 및 퇴적상의 변화는 하성퇴적물의 특성과 관련된다. 하천에서는 하상경사를 비롯한 지형상의 특성, 이에 따른 유속과 유량의 변화, 주변 지질을 구성하는 암석의 성분 및 기후 등이 퇴적물의 공급과 공간적 변화의 요인으로 작용한다(Miall, 1977; 유환수 외, 2000; 김주용 외, 2001). 연구지역에서 하상경사는 영산강 중상류에 위치한 관계로 비교적 경사가 크며, 지형에 따른 유로의 방향 변화가 심하다. 또한, 하천의 일부 구간에는 수질 정화 및 유량확보를 위한 보(dammed pool) 등의 인공 구조물들이 설치되어 있다. 이와 같이 급한 하상경사와 유로의 방향변화는 유속에 큰 변화를 주며, 인공 구조물들은 유수의 일시적인 정체를 가져올 수 있다. 따라서 연구지역에서 하성퇴적물의 입도분포가 광범위한 것은, 유속의 변화와 인공 구조물들에 의한 간섭현상 등이 작용한 결과로 생각된다. 한편, 연구지역에는 선캄브리아기 화강편마암류와 주라기 화강암류들이 넓게 분포하는데, 모암이 화강암류와 같이 결정질이고 조립질인 경우는 그 풍화산물이 자갈을 거쳐 모래로 퇴적될 수 있다(박춘식, 1996). 이런 관점에서 볼 때, 연구지역 하성퇴적물에 분포하는 조립질 퇴적물 대부분도, 연구지역이 하계의 상류부분에 해당한다는 점을 고려할 때, 전술한 암체들의 풍화산물에서 유래되었을 것으로 판단된다.

주성분원소 함량 및 분포

연구지역 시료들을 대상으로 분석한 주성분원소들

의 함량은 중량 백분율과 ppm(part per million)으로 나타냈다. 그리고 이에 부가하여 연구지역 인근에서 시행된 시추퇴적물(은고요나, 1998)과 Mason and Moore(1982)에 의해 제시된 지각 평균함량값과 비교하였다(Table 2).

영산강 본류에서 주성분원소들의 평균함량을 보면, Al을 비롯한 대다수 원소들이 인근 시추퇴적물(YSC)의 평균함량과 지각평균치보다 낮은 값을 보이는데, K는 평균 2.77%로 지각평균함량보다 높게 나타났다. 황룡강에서는 본류에 비해 주성분원소들의 상대적 함량이 다소 높게 나타났으나, 시추퇴적물(HRC)과 지각 평균함량과의 비교에서는 낮은 함량을 보였다. 반면, 광주천에서는 Al, Na, K는 YSC에 비해 함량이 낮으나, Fe, Mg, Ca, Ti, P, Mn 등은 높은 함량을 보였으며, 특히 P는 지각평균함량에 비해 높게 나타났다.

연구지역에서 금속원소의 함량 변화를 살펴보면, 본류에서 Al의 경우, 광주천이 함유하는 극락교 부근(YS 5)에서 7.04%의 높은 값을 보였다. 황룡강의 HR 6 정점에서 9.07%를, 광주천의 상류인 GJ 2에서 9.61%의 최고치를 나타냈으며, Fe, Mg, Ti 등의 주성분 원소들도 유사한 경향을 보였다. 반면, Ca, Na, K 등은 Al 등의 원소와는 상이한 분포를 보였다(Fig. 4).

미량원소 함량 및 분포

연구지역인 영산강 본류에서 미량원소들의 평균함량을 보면, Zr을 제외한 대다수 금속원소들이 YSC의 평균함량보다 낮은 함량을 보였으며, 지각평균함량과의 비교에서는 Ba, Zr, Pb 등의 함량이 높게 나타났다(Table 3). 황룡강 퇴적물의 경우, Li, Y, Zr, Pb 등의 원소들이 HRC의 평균함량보다 높은 값을 보였으

Table 2. Major element contents of the surface sediments in the study area

(unit in %, *ppm)

Station	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	Ti*	P*	Mn*
YS 1	3.87	0.85	0.12	0.46	0.69	2.81	3656	131	387
YS 2	4.19	1.15	0.11	0.78	0.69	2.56	3297	131	387
YS 3	4.28	1.23	0.11	0.62	0.76	2.79	3776	131	387
YS 4	5.44	1.73	0.23	1.37	0.91	2.82	3656	305	387
YS 5	7.04	2.35	0.43	0.71	0.94	2.98	2697	567	465
YS 6	4.90	1.15	0.21	0.61	0.86	3.01	1439	305	232
YS 7	5.20	1.48	0.25	0.57	0.76	2.88	2458	349	310
YS 8	3.87	0.66	0.12	0.34	0.66	2.52	779	175	232
YS 9	3.70	0.67	0.10	0.34	0.52	2.57	899	175	77
Min.	3.70	0.66	0.10	0.34	0.52	2.52	779	131	77
Max.	7.04	2.35	0.43	1.37	0.94	3.01	3776	567	465
Aver.	4.72	1.25	0.19	0.64	0.75	2.77	2518	252	318
SD	1.07	0.54	0.11	0.31	0.13	0.18	1206	146	119
HR 1	4.31	1.02	0.22	0.36	0.68	2.81	1199	262	310
HR 2	4.21	0.87	0.16	0.20	0.56	3.02	1259	175	310
HR 3	3.49	0.69	0.13	0.23	0.50	2.37	719	131	77
HR 4	5.03	1.06	0.21	0.35	0.79	2.96	1499	175	155
HR 5	5.89	1.70	0.40	0.23	0.56	3.15	2158	305	232
HR 6	9.07	4.22	0.78	0.53	1.11	3.10	3357	480	697
HR 7	6.87	2.36	0.47	0.71	1.31	2.86	2458	349	542
HR 8	4.34	0.88	0.19	0.32	0.84	2.46	1199	175	232
Min.	3.49	0.69	0.13	0.20	0.50	2.37	719	131	77
Max.	9.07	4.22	0.78	0.71	1.31	3.15	3357	480	697
Aver.	5.40	1.60	0.32	0.37	0.79	2.84	1731	256	319
SD	1.83	1.19	0.22	0.18	0.28	0.29	864	118	205
GJ 1	7.28	4.34	1.25	1.74	1.19	2.26	3956	829	852
GJ 2	9.61	4.88	1.39	1.66	1.04	2.12	4975	1746	1317
GJ 3	9.57	4.78	1.27	1.68	1.07	2.15	4915	1702	1317
GJ 4	7.73	3.88	1.03	1.44	0.68	1.72	3896	5979	1549
GJ 5	8.38	4.02	0.98	1.57	1.02	2.24	4016	2531	774
GJ 6	6.13	1.77	0.45	1.07	1.42	2.32	1678	698	387
GJ 7	6.72	3.32	0.83	1.61	0.57	1.48	3057	7201	542
GJ 8	7.99	2.57	0.90	1.03	1.15	2.27	4316	305	465
GJ 9	5.14	1.54	0.35	0.86	0.99	2.49	1439	655	310
GJ10	5.06	1.14	0.27	0.64	1.02	2.75	1139	262	155
GJ11	5.64	2.19	0.37	1.44	0.77	2.08	1858	786	310
GJ12	4.91	1.43	0.31	0.79	0.89	2.52	1618	393	232
Min.	4.91	1.14	0.27	0.64	0.57	1.48	1139	262	155
Max.	9.61	4.88	1.39	1.74	1.42	2.75	4975	7201	1549
Aver.	7.01	2.99	0.78	1.29	0.98	2.20	3072	1924	684
SD	1.68	1.38	0.42	0.39	0.23	0.34	1441	2298	477
YSC ¹	7.46	2.46	0.46	0.84	1.11	2.78	2577	349	387
HRC ²	5.65	1.69	0.32	0.35	0.92	2.89	1678	305	310
MC ²	8.13	5.00	2.09	3.63	2.83	2.59	4400	1050	950

(¹YS core mean value, ²HR core mean value, ³Mean crust value; modified after, ^{1,2}Eun, 1998; ³Mason and Moore, 1982)

며, 지각평균함량과의 비교에서는 Ba, Li, Zr, Pb 등이 높게 나타났다. 반면, 광추천에서는 많은 미량금속원소들이 YSC와 지각평균함량보다 낮은 값을 보

이나, Cu, Zn, Pb, Cd 등의 특정원소는 YSC와 지각평균에 비해 5배 이상의 높은 함량치를 나타냈다 (Fig. 4).

Table 3. Minor elements, mean grain size and organic carbon contents of the surface sediments in the study area

(unit in ppm, *φ, **%)

Station	Ba	Co	Cr	Cu	Li	Ni	Sc	Sr	V	Y	Zn	Zr	Pb	Cd	Mz*	C-org**
YS 1	629	1	3	1	12	3	3	122	19	20	21	273	18	<1	-1.43	0.13
YS 2	761	2	2	1	12	2	3	157	25	14	19	321	17	<1	-2.08	0.18
YS 3	691	2	3	2	9	3	3	141	26	11	26	337	17	<1	-0.90	0.16
YS 4	712	3	10	4	13	4	8	202	35	22	42	292	19	<1	1.65	0.16
YS 5	836	5	21	14	29	15	6	189	37	13	111	229	28	<1	3.05	0.85
YS 6	824	1	8	2	14	7	4	167	20	8	41	385	19	<1	0.97	0.16
YS 7	735	3	14	9	20	6	5	153	28	12	48	318	21	<1	0.93	2.96
YS 8	673	0	3	1	13	3	2	137	11	6	21	345	14	<1	0.18	0.13
YS 9	681	0	4	1	10	3	2	125	12	5	19	353	14	<1	0.27	0.11
Min.	629	0	2	1	9	2	2	122	11	5	19	229	14	-	-2.08	0.11
Max.	836	5	21	14	29	15	8	202	37	22	111	385	28	-	3.05	2.96
Aver.	727	2	8	4	15	5	4	155	24	12	39	317	18	-	0.29	0.54
SD	70	2	6	5	6	4	2	27	9	6	29	47	4	-	1.60	0.94
HR 1	573	0	7	1	18	5	3	131	17	6	26	329	15	<1	-2.80	0.15
HR 2	624	0	6	0	16	4	2	118	14	6	25	333	17	<1	-0.65	0.08
HR 3	487	1	3	0	13	3	2	99	11	4	17	357	13	<1	-2.15	0.07
HR 4	743	0	9	1	23	5	3	146	15	7	30	334	15	<1	-1.67	0.12
HR 5	610	3	29	7	33	13	6	103	30	17	40	521	25	<1	1.12	0.52
HR 6	675	9	10	5	48	5	13	172	82	27	79	151	14	<1	1.67	0.33
HR 7	782	4	17	5	29	8	6	228	42	10	65	206	21	<1	1.20	0.26
HR 8	680	1	4	1	17	3	2	171	14	4	25	325	12	<1	-0.18	0.02
Min.	487	0	3	0	13	3	2	99	11	4	17	151	12	-	-2.80	0.02
Max.	782	9	29	7	48	13	13	228	82	27	79	521	25	-	1.67	0.52
Aver.	647	2	11	3	25	6	5	146	28	10	38	320	17	-	-0.43	0.19
SD	94	3	9	3	12	3	4	43	24	8	22	109	4	-	1.68	0.17
GJ 1	832	12	45	16	50	19	12	289	97	19	80	185	23	<1	0.03	0.29
GJ 2	719	16	55	66	59	24	15	232	111	23	225	111	46	<1	2.77	2.37
GJ 3	740	15	52	66	58	24	14	241	108	23	215	131	48	<1	4.85	2.66
GJ 4	922	12	69	290	51	67	11	229	75	19	951	82	81	2	6.47	9.19
GJ 5	738	11	48	79	51	30	12	242	80	22	337	159	44	1	1.75	4.21
GJ 6	752	3	16	15	25	10	6	230	37	12	87	267	15	<1	-0.53	0.57
GJ 7	677	8	73	250	34	38	9	172	57	17	792	64	80	3	6.60	17.28
GJ 8	756	12	50	13	46	22	12	226	88	22	77	121	17	<1	5.30	1.34
GJ 9	782	2	19	12	20	8	5	194	30	9	69	210	33	<1	0.80	0.59
GJ10	851	2	10	3	17	6	4	181	23	7	36	267	21	<1	-0.05	0.18
GJ11	655	3	20	28	25	11	6	261	49	12	115	252	26	<1	0.73	1.21
GJ12	766	3	13	9	15	9	5	181	30	9	68	286	22	<1	0.43	0.33
Min.	655	2	10	3	15	6	4	172	23	7	36	64	15	-	-0.53	0.18
Max.	922	16	73	290	59	67	15	289	111	23	951	286	81	3	6.60	17.28
Aver.	766	8	39	71	38	22	9	223	65	16	254	178	38	-	2.43	3.35
SD	74	5	22	97	17	17	4	35	32	6	303	78	23	-	2.67	5.07
YSC	744	8	34	28	25	16	8	183	49	15	50	45	18	-	-	-
HRC	715	6	24	12	24	12	4	153	31	9	38	37	16	-	-	-
MC	425	25	100	55	20	75	22	375	135	33	70	165	13	0.2	-	-

하천들의 금속원소 함량분포의 유의미한 차이를 살펴보기 위하여 T-검정(유의수준 0.05)을 실시한 결과, 영산강 본류와 황룡강의 퇴적물에 비해 광주천 퇴적

물에서 Co, Cr, Cu, Li, Ni, Zn, Pb 등의 대다수 미량원소들이 높게 나타났다(Table 4). 특히 미량원소들 중 Cu, Zn, Pb 등은 GJ 4와 GJ 7에서 매우 높은 값

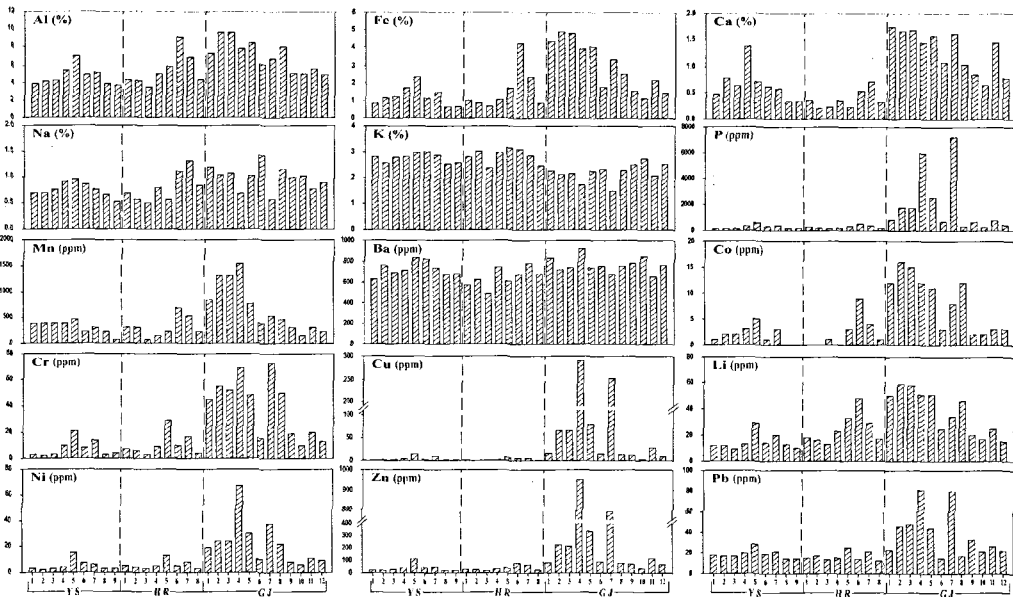


Fig. 4. Variations of metal contents in the study area.

Table 4. Independent samples t-test of minor elements in the study area.

		YS vs HR					YS vs GJ					HR vs GJ				
		Levene's Test for Equality of Variances		T-test Equality of Means			Levene's Test for Equality of Variances		T-test Equality of Means			Levene's Test for Equality of Variances		T-test Equality of Means		
		F	Sig.	t	df	Sig.	F	Sig.	t	df	Sig.	F	Sig.	t	df	Sig.
Ba	EVA	0.68	0.42	2.01	15.00	0.06	0.00	0.95	-1.22	19.00	0.24	0.72	0.41	-3.16	18.00	0.01
	EVNA			1.97	12.78	0.07			-1.23	17.96	0.23			-3.01	12.59	0.01
Co	EVA	2.31	0.15	-0.31	15.00	0.76	22.93	0.00	-3.42	19.00	0.00	7.31	0.01	-2.85	18.00	0.01
	EVNA			-0.30	10.26	0.77			-3.88	13.55	0.00			-3.16	17.78	0.01
Cr	EVA	0.26	0.62	-0.84	15.00	0.42	20.74	0.00	-4.08	19.00	0.00	14.10	0.00	-3.41	18.00	0.00
	EVNA			-0.82	12.94	0.43			-4.64	13.35	0.00			-3.99	15.23	0.00
Cu	EVA	0.95	0.35	0.74	15.00	0.47	8.42	0.01	-2.05	19.00	0.05	7.70	0.01	-1.97	18.00	0.06
	EVNA			0.77	13.22	0.46			-2.38	11.07	0.04			-2.43	11.03	0.03
Li	EVA	3.18	0.09	-2.24	15.00	0.04	21.78	0.00	-3.92	19.00	0.00	4.53	0.05	-1.91	18.00	0.07
	EVNA			-2.16	10.40	0.06			-4.39	14.77	0.00			-2.05	17.90	0.06
Ni	EVA	0.13	0.72	-0.35	15.00	0.73	5.00	0.04	-2.93	19.00	0.01	4.94	0.04	-2.67	18.00	0.02
	EVNA			-0.36	14.93	0.73			-3.35	12.59	0.01			-3.25	12.21	0.01
Sc	EVA	1.98	0.18	-0.43	15.00	0.67	9.30	0.01	-3.69	19.00	0.00	0.54	0.47	-2.64	18.00	0.02
	EVNA			-0.42	10.36	0.68			-4.02	17.19	0.00			-2.65	15.47	0.02
Sr	EVA	1.46	0.24	0.51	15.00	0.62	0.56	0.46	-4.82	19.00	0.00	0.33	0.57	-4.39	18.00	0.00
	EVNA			0.49	11.61	0.63			-5.00	18.94	0.00			-4.20	12.94	0.00
V	EVA	3.53	0.08	-0.52	15.00	0.61	19.46	0.00	-3.80	19.00	0.00	2.58	0.13	-2.81	18.00	0.01
	EVNA			-0.49	8.76	0.63			-4.31	13.31	0.00			-2.97	17.59	0.01
Y	EVA	0.58	0.46	0.66	15.00	0.52	0.53	0.47	-1.46	19.00	0.16	0.15	0.70	-1.93	18.00	0.07
	EVNA			0.64	12.64	0.53			-1.47	17.73	0.16			-1.82	12.16	0.09
Zn	EVA	0.07	0.80	0.02	15.00	0.98	8.99	0.01	-2.11	19.00	0.05	8.17	0.01	-1.99	18.00	0.06
	EVNA			0.02	14.64	0.98			-2.45	11.27	0.03			-2.46	11.17	0.03
Zr	EVA	1.60	0.23	-0.06	15.00	0.95	4.95	0.04	4.74	19.00	0.00	0.02	0.88	3.39	18.00	0.00
	EVNA			-0.06	9.24	0.95			5.09	18.30	0.00			3.17	11.67	0.01
Pb	EVA	0.16	0.70	0.98	15.00	0.34	12.53	0.00	-2.51	19.00	0.02	10.46	0.00	-2.61	18.00	0.02
	EVNA			0.98	14.58	0.34			-2.89	11.99	0.01			-3.18	12.21	0.01

(EVA: equal variances assumed, EVNA: equal variances not assumed)

Table 5. Correlation matrixs in the study area.

	Al	Fe	Ca	P	Mn	Ba	Co	Cr	Cu	Li	Ni	Zn	Zr	Pb	Mean	C-org
Al	1.00															
Fe	0.97	1.00														YS
Ca	0.49	0.61	1.00													
P	0.96	0.86	0.29	1.00												
Mn	0.55	0.69	0.54	0.32	1.00											
Ba	0.74	0.66	0.27	0.73	0.23	1.00										
Co	0.91	0.98	0.57	0.78	0.76	0.58	1.00									
Cr	0.95	0.88	0.30	0.98	0.37	0.66	0.83	1.00								
Cu	0.92	0.87	0.21	0.93	0.46	0.59	0.87	0.97	1.00							
Li	0.89	0.79	0.10	0.93	0.42	0.65	0.78	0.93	0.95	1.00						
Ni	0.90	0.80	0.10	0.94	0.36	0.74	0.73	0.91	0.89	0.93	1.00					
Zn	0.96	0.90	0.26	0.96	0.48	0.70	0.84	0.95	0.94	0.94	0.98	1.00				
Zr	-0.61	-0.67	-0.32	-0.51	-0.74	-0.08	-0.73	-0.57	-0.65	-0.64	-0.54	-0.64	1.00			
Pb	0.96	0.93	0.35	0.93	0.61	0.68	0.91	0.94	0.93	0.92	0.92	0.96	-0.71	1.00		
Mean	0.82	0.69	0.29	0.91	0.06	0.55	0.56	0.87	0.76	0.74	0.80	0.82	-0.32	0.71	1.00	
C-org	0.38	0.36	-0.06	0.45	0.10	0.20	0.45	0.57	0.62	0.54	0.31	0.35	-0.17	0.43	0.31	1.00
Al	1.00															
Fe	0.98	1.00														HR
Ca	0.70	0.67	1.00													
P	0.95	0.95	0.68	1.00												
Mn	0.88	0.90	0.77	0.91	1.00											
Ba	0.52	0.38	0.69	0.36	0.48	1.00										
Co	0.94	0.98	0.60	0.91	0.83	0.27	1.00									
Cr	0.43	0.32	0.17	0.47	0.19	0.24	0.33	1.00								
Cu	0.76	0.69	0.46	0.79	0.55	0.34	0.71	0.89	1.00							
Li	0.97	0.95	0.54	0.93	0.78	0.40	0.92	0.53	0.82	1.00						
Ni	0.36	0.25	0.12	0.42	0.13	0.18	0.26	1.00	0.85	0.47	1.00					
Zn	0.98	0.96	0.80	0.94	0.92	0.53	0.92	0.41	0.75	0.91	0.34	1.00				
Zr	-0.57	-0.62	-0.77	-0.51	-0.76	-0.46	-0.56	0.40	0.01	-0.38	0.46	-0.64	1.00			
Pb	0.26	0.15	0.11	0.32	0.13	0.20	0.14	0.94	0.74	0.32	0.95	0.28	0.43	1.00		
Mean	0.80	0.75	0.48	0.72	0.68	0.51	0.79	0.60	0.82	0.78	0.52	0.80	-0.26	0.49	1.00	
C-org	0.65	0.59	0.23	0.71	0.40	0.12	0.60	0.92	0.94	0.76	0.90	0.60	0.21	0.79	0.66	1.00
Al	1.00															
Fe	0.91	1.00														GJ
Ca	0.74	0.91	1.00													
P	0.25	0.40	0.48	1.00												
Mn	0.83	0.88	0.71	0.46	1.00											
Ba	-0.08	-0.03	-0.26	0.05	0.28	1.00										
Co	0.96	0.93	0.74	0.31	0.85	0.05	1.00									
Cr	0.74	0.80	0.74	0.78	0.74	0.01	0.81	1.00								
Cu	0.28	0.41	0.44	0.98	0.55	0.18	0.34	0.77	1.00							
Li	0.97	0.95	0.80	0.31	0.87	0.06	0.98	0.79	0.35	1.00						
Ni	0.50	0.56	0.52	0.84	0.74	0.35	0.57	0.84	0.92	0.59	1.00					
Zn	0.28	0.41	0.44	0.97	0.55	0.19	0.34	0.77	1.00	0.35	0.93	1.00				
Zr	-0.73	-0.74	-0.64	-0.73	-0.71	-0.00	-0.78	-0.97	-0.73	-0.76	-0.80	-0.72	1.00			
Pb	0.38	0.53	0.53	0.95	0.62	0.08	0.42	0.80	0.95	0.42	0.86	0.95	-0.78	1.00		
Mean	0.55	0.49	0.41	0.74	0.56	0.00	0.59	0.86	0.77	0.54	0.79	0.76	-0.89	0.77	1.00	
C-org	0.18	0.31	0.42	0.97	0.29	-0.12	0.23	0.74	0.90	0.21	0.71	0.89	-0.71	0.88	0.74	1.00

(correlation is significant at the 0.01 level; 2-tailed)

을 보였으며, Cd의 경우에도 2~3ppm의 함량치를 보여 연구지역 대부분에서 Cd 분석 검출한계(detection limit; 1ppm) 이하를 보인 것과 대조적이었다.

금속원소 함량변화의 조절 요인

퇴적물 내의 금속원소 함량 변화는 근원물질, 퇴적물의 입도, 유기물, 산화물 등의 영향에 민감한 것으로 알려져 있다(Förstner and Wittmann, 1981; Salomons and Förstner, 1984; Adriano, 1986; Horowitz, 1991; Huisman *et al.*, 1997). 연구지역인 영산강 본류에서 금속원소들의 함량변화를 보면, Al, Fe, P, Cr, Cu, Li, Zn, Pb 등의 많은 금속원소들은 퇴적물의 평균 입도와 r=0.7 이상의 높은 상관성을 보이며, 입도의 세립화에 따라 증가하는 경향을 보였다(Table 5). 이들 금속원소들은 주로 입도 및 점토광물의 주성분 원소들과 밀접한 관련성을 보여, 입도의 세립화에 따른 알루미늄-규산염 광물의 영향이 일부 작용하고 있음을 시사한다. 또한 K와 Ba의 함량이 비교적 높게 나타나 화강암과 화강편마암 등에서 기원한 광물질들이 영향을 미치는 것으로 판단된다(조영길과 김주용, 1998; Krauskopf, 1982).

황룡강 하상퇴적물의 금속원소 함량분포는 분류와 매우 유사하나, 황룡강 하류 지역에서 Cr, Cu, Ni 등의 일부 금속원소들이 상대적으로 높은 함량을 보였다. 이들 원소들은 주로 산업폐수 등의 영향을 받는

금속원소들로, 시화공단, 남동공단, 반월공단 등이 가동되는 경기만 주변에서도 높게 나타나는 것으로 보고된 바 있다(이종현 외, 1998). 황룡강이 관류하는 광주광역시 광산구는 1990년 이후 급속하게 진행된 산업화에 따라 현재 평동공단, 소촌공단, 하남공단, 침단단지 등이 가동 또는 조성 중에 있다. 따라서 이들 산업단지에서 배출되는 산업폐수 및 생활하수 등이 하상퇴적물 내의 일부 금속원소 함량 분포에 영향을 미친 것으로 판단된다.

광주천의 경우, 영산강 본류와 황룡강에 비해, 입도와 금속원소의 상관성은 상대적으로 저조하였다. 이렇게 광주천의 퇴적물에서 금속원소들의 함량 분포가 일반적 경향과 다른 것은, 퇴적물의 입도분포 이외 다른 요인들의 작용으로 인하여 입도에 의한 영향이 상대적으로 약화된 결과로 사료된다. 특히 광주천에서 P, Cu, Zn, Pb 등의 금속원소들은 유기탄소와 r=0.9 내외의 높은 상관성을 보여주었다. P의 경우 대표적인 생활하수 등에 의한 오염물질로 유기물에 다량 함유되며, Cu, Zn, Pb 등의 중금속원소들과 함께 유기물에 흡착되는 특성을 보인다(Irving and William, 1948; 오강호 외, 2002). 이는 광주천에서 금속원소들의 함량분포를 조절하는 요인으로, 생활하수 등에 의한 유기물의 영향이 크게 작용하고 있음을 시사한다.

이와 같이, 퇴적물 내의 금속원소 함량변화는 입도

Table 6. Enrichment factors(EF) and indices of geoaccumulation(Igeo) for metals in the study area.

		Fe	Na	K	Ti	P	Mn	Ba	Co	Cr	Cu	Li	Ni	Zn	Pb
YS (EF)	Min.	0.28	0.38	1.33	0.37	0.24	0.18	2.27	0.00	0.04	0.04	0.86	0.05	0.53	2.23
	Max.	0.54	0.51	2.28	1.74	0.62	0.86	3.52	0.23	0.24	0.29	1.67	0.23	1.83	2.84
	Aver.	0.42	0.46	1.90	1.00	0.39	0.58	3.02	0.12	0.12	0.10	1.24	0.11	0.87	2.45
HR (EF)	Min.	0.32	0.27	1.07	0.38	0.27	0.19	1.42	0.00	0.07	0.00	1.51	0.06	0.57	0.99
	Max.	0.76	0.55	2.25	0.68	0.47	0.67	3.00	0.32	0.40	0.18	2.28	0.24	1.10	2.61
	Aver.	0.44	0.43	1.76	0.57	0.36	0.48	2.43	0.11	0.15	0.06	1.79	0.12	0.78	2.02
GJ (EF)	Min.	0.37	0.24	0.69	0.42	0.30	0.26	1.43	0.13	0.16	0.09	1.24	0.13	0.83	1.36
	Max.	0.97	0.66	1.70	1.00	8.30	1.71	3.22	0.54	0.88	5.54	2.79	0.94	14.28	7.41
	Aver.	0.66	0.42	1.06	0.77	2.05	0.77	2.21	0.35	0.43	1.40	2.08	0.33	4.03	3.38
YS (Igeo)	Min.	-2.49	-1.68	-0.73	-2.31	-2.00	-2.91	-0.83	-	-4.67	-5.39	-2.06	-3.58	-1.98	-0.92
	Max.	-0.65	-0.83	-0.47	-0.03	0.12	-0.32	-0.42	-	-1.28	-1.58	-0.37	-0.68	0.57	0.05
	Aver.	-1.67	-1.17	-0.59	-0.83	-1.24	-1.01	-0.62	-	-3.20	-4.17	-1.45	-2.51	-1.22	-0.58
HR (Igeo)	Min.	-1.89	-1.45	-0.87	-1.81	-1.81	-2.58	-1.14	-	-3.58	-	-1.47	-2.58	-1.75	-1.00
	Max.	0.73	-0.08	-0.46	0.42	0.07	0.58	-0.46	-	-0.31	-	0.42	-0.47	0.47	0.04
	Aver.	-0.94	-0.87	-0.62	-0.69	-0.96	-0.82	-0.74	-	-2.12	-	-0.67	-1.82	-0.75	-0.58
GJ (Igeo)	Min.	-1.69	-1.55	-1.50	-1.76	-1.00	-1.91	-0.77	-2.58	-2.35	-3.81	-1.32	-2.00	-1.06	-0.83
	Max.	0.40	-0.24	-0.60	0.36	3.78	1.42	-0.28	0.42	0.52	2.79	0.65	1.48	3.66	1.59
	Aver.	-0.46	-0.80	-0.94	-0.51	1.07	-0.11	-0.55	-0.93	-0.66	-0.45	-0.15	-0.45	1.00	0.28

등의 특정 요인에 의해 결정되기도 하나, 대부분 여러 요인들이 복합적으로 작용함으로써 다양한 함량변화를 가져온다. 즉 영산강 본류와 황룡강에서 금속원소들의 함량 변화는 입도 및 점토광물의 주성분 원소들과 밀접한 관련성을 보이며, 주변 지질의 영향 역시 작용하고 있음을 시사한다. 반면, 광주천에서는 생활하수 등에 의한 유기물의 영향이 큰 것으로 나타났다.

금속원소의 오염

퇴적물 내의 금속원소의 오염 또는 인위적인 영향 등을 파악하기 위해서, Bruland *et al.*(1974)에 의한 부화계수(Enrichment Factor; EF)와 Müller(1979)에 의한 농집지수(index of geoaccumulation; Igeo)를 구하였다(Table 6). 부화계수는 퇴적물 내 점토광물의 구성비율과 미량원소의 상대적인 함량변화를 이용하여 금속원소 농축평가에 사용된다(김주용 외 2001; 오강호 외, 2002). 농집지수는 호수, 강, 해양퇴적물의 중금속함량을 오염되지 않은 지역의 중금속 함량과 비교하여 정량하는 방법으로, 퇴적물 오염 정도를 평가하는데 사용된다(이평구와 이재영, 1997; 이평구 외, 2001; 신상은 외, 2002). 본 연구에서 부화계수의 보존성원소로는 그 기원이 대부분 지각물질로 알려져

Table 7. Classment of index of geoaccumulation(after Müller, 1979).

Igeo	Igeo-class	Designation of sediment quality
> 5	6	very strongly polluted
4-5	5	strongly / very strongly polluted
3-4	4	strongly polluted
2-3	3	moderately / strongly polluted
1-2	2	moderately polluted
0-1	1	practically unpolluted / moderately polluted
0	0	practically unpolluted

있고, 연구지역에서 상대적으로 함량 변화와 편차가 작은 Al을 사용하였으며, 지각 평균값은 Mason and Moore(1982)에 의해 제시된 클라크 농도(clark of concentration)를 사용하였다. 농집지수의 바탕값(background value)으로는 은고요나(1998)에 의해 조사된 연구지역 인근 영산강 시추퇴적물 YSC와 HRC의 평균값을 사용하였다.

$$EF = \frac{Metal_{(sediment)} / Metal_{(crust)}}{Al_{(sediment)} / Al_{(crust)}}$$

$$Igeo = \log_2 \left(\frac{Metal_{(sediment)}}{Metal_{(background)} \times 1.5} \right)$$

영산강 본류에서의 부화계수는 K가 1.33~2.28(평

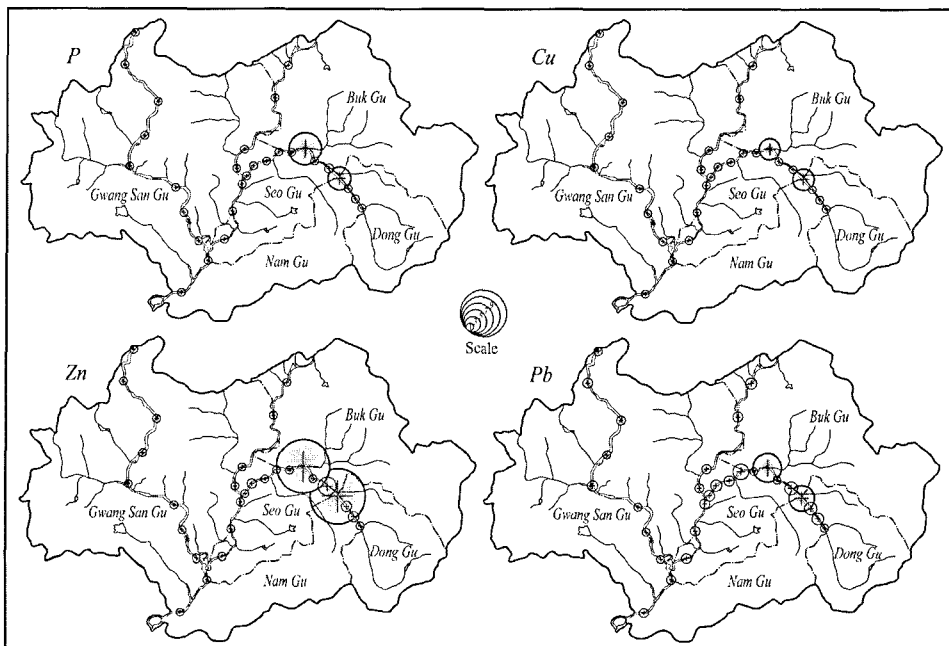


Fig. 5. Spatial distributions of EF for P, Cu, Zn and Pb in the study area.

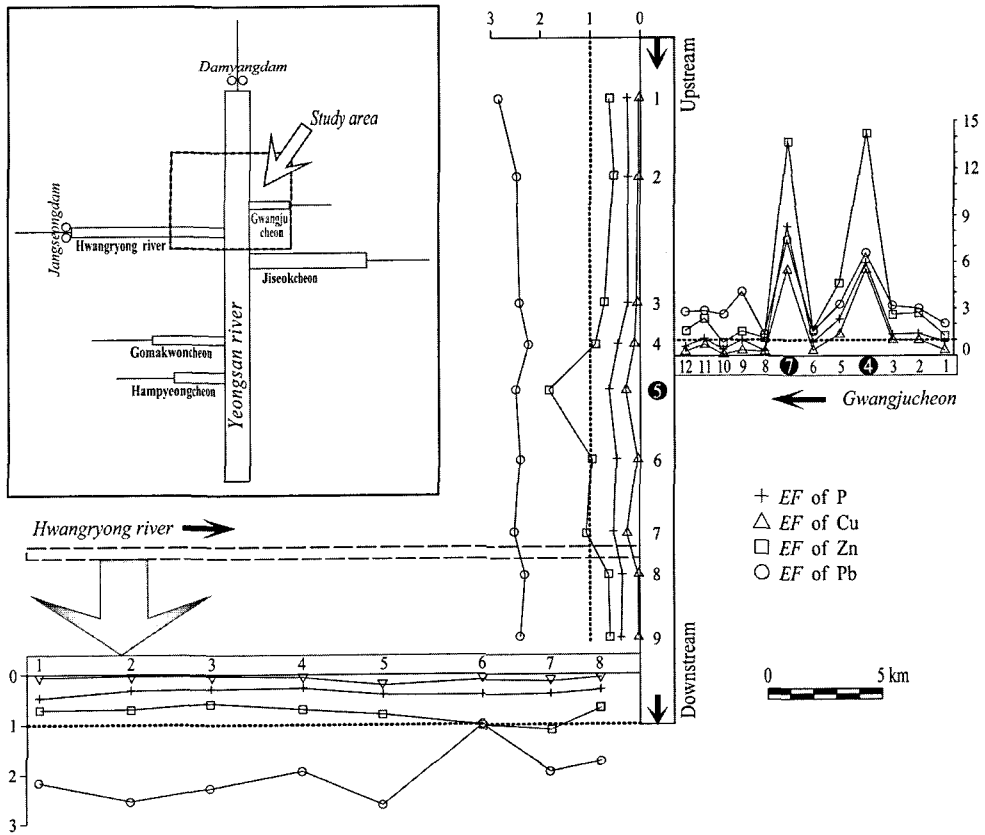


Fig. 6. Contamination model chart of P, Cu, Zn and Pb in the study area.

균 1.90), Ti 0.37~1.74(1.00), Ba 2.27~3.52(3.02), Li 0.86~1.67(1.24), Pb 2.23~2.84(2.45), 황룡강에서는 K 1.07~2.25(1.76), Ba 1.42~3.30(2.43), Li 1.51~2.28 (1.79), Pb 0.99~2.61(2.02)의 값을 보였다. 반면, 광주천에서는 P 0.30~8.30(2.05), Cu 0.09~5.54(1.40), Zn 0.83~14.28(4.03), Pb 1.36~7.41(3.38) 등의 값을 보여 이들 금속원소의 오염이 상당히 진행된 것으로 나타났다. 한편, 연구지역 금속원소의 상대적 농축정도를 파악하기 위한 농집지수들을 보면(Table 7), 본류와 황룡강에서 분석된 금속원소들 모두 '비오염 (practically unpolluted)'에 해당하여, 오염에 의한 영향이 미비한 것으로 나타났다. 그러나 광주천 하상퇴적물의 경우, 시료 채취 지점에 따라 최대값이 Mn 1.42, Ni 1.48, Pb 1.59로 '보통 오염(moderately polluted)'에, Cu 2.79로 '보통/강한 오염(moderately/strongly polluted)'을 나타냈으며, P와 Zn은 각각 3.78, 3.66의 '강한 오염(strongly polluted)'으로 나타났다.

금속원소의 오염과 관련되어 산정한 부화계수와 농집지수를 종합한 결과, 본류와 황룡강 퇴적물에서는 특별히 금속원소가 농축되지는 않으나, 광주천에서는 P, Cu, Zn, Pb 등에 의한 금속원소 농축이 진행된 것으로 보인다. 광주천에서 이들 금속원소들은 특정 지점에서 부화계수 > 5의 값과 농집지수 > 2의 값을 보여주어, 오염물질로서 광주광역시를 관류하는 하천에 영향을 미치는 것으로 파악되었다. 주성분원소인 P와 Cu, Zn, Pb 등의 미량원소는 환경유해원소로써 널리 알려져 있다. 또한, 하천 바닥에 장기간 체류할 경우, 하천의 기능을 저하시켜 수중생물의 생태와 환경을 파괴하는 유해 요인으로 작용할 수도 있다(Aston, 1974; Wittmann, 1983; Horowitz, 1991).

Fig. 5는 상기한 금속원소들의 농축정도를 효과적으로 파악하기 위해 부화계수를 이용하여 작성한 공간적 오염분포도이다. 연구지역에서 나타난 P, Cu, Zn, Pb 등의 부화계수는 광주광역시 북구와 동·서구의 경계를 이루는 GJ 4와 GJ 7에서 높은 분포도를

보인다. 이 지점들은 광주천의 제 2 지류인 동계천과 서방천이 유입되는 곳으로, 이들 소하천들은 인구가 밀집되어 있는 광주광역시 동구와 북구에 위치하고 있다. 따라서, 생활 하수 등이 유입된 상태로, 이들 동계천과 서방천 등의 소하천들이 광주광역시의 도심을 관류하여 광주천에 합류함으로써 특정원소들에 의한 광주천의 오염을 증가시킨 것으로 판단된다.

한편, 연구지역에서 이들 원소들을 대상으로 오염 물질의 이동 경로를 파악하기 위하여 모식도를 작성하였다(Fig. 6). 광주천의 지류인 동계천(GJ 4)과 서방천(GJ 7)이 유입되는 지점, 광주천이 합류하는 본류의 극락교 부근(YS 5)에서 P, Cu, Zn, Pb 등의 금속원소 오염이 있는 것으로 나타났다. 특히 소하천들이 유입되는 부근에서는 오염 정도가 높은 것으로 보아, 도심을 관류하는 소하천들에 대한 영향인들을 앞으로 보다 면밀히 고려해 볼 필요가 있는 것으로 생각된다.

결 론

1. 광주광역시를 관류하는 영산강 본류, 황룡강, 광주천에서 채취된 퇴적물의 입도분포를 조사한 결과, 퇴적물들의 입도는 평균적으로 조립사에 해당하며, 분급도는 매우 불량하게 나타났다.
2. 영산강 본류와 황룡강에서 채취한 하상퇴적물 중의 주성분원소 및 미량성분원소의 함량은 지각평균 함량과 인근 영산강 유역 시추퇴적물들에 있어서의 평균함량보다 낮게 나타났으나, 광주천에서는 P, Cu, Zn, Pb 등 환경유해원소들의 함량이 높게 나타났다.
3. 영산강 본류와 황룡강의 퇴적물에 함유된 금속원소들의 함량분포는 퇴적물의 입도 및 점토광물의 주성분 원소들과의 밀접한 관련성과 함께, 주변 지질의 영향이 일부 조절요인으로 작용하고 있음을 반영하였다. 반면, 광주천에서는 생활하수 등에 의한 유기물의 영향이 인지되었다.
4. 금속원소의 오염을 파악하기 위한 부화계수와 농축지수를 산출한 결과, 영산강 본류와 황룡강 퇴적물 중의 금속원소들의 함량은 유의할 만한 수준의 오염이 진행되지는 않은 상태임을 지시하였다. 반면, 광주천에서는 P, Cu, Zn, Pb 등 금속원소들이 동계천과 서방천이 합류하는 지점에서 부화계수 > 5의 값과 농축지수 > 2의 값을 보여, 광주광역시를 관류하는 하천들이 오염되고 있는 것으로 나타났다.

사 사

논문의 미진한 부분을 세심하게 살펴주시고 많은 도움이 될 조언을 해 주신 고려대 윤성택 교수님과 익명의 두 분 심사위원들께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- 건설교통부, 1999, 하천수 사용실태조사-영산강·섬진강 수계 하천수 사용실태 조사 및 하천유지유량 산정 보고서. 754 p.
- 과학기술부, 1997, 광주 지질도폭 설명서(1:250,000). 82 p.
- 광주광역시, 1996, 영산강 수질관리 종합대책 수립에 관한 연구. 409 p.
- 김경웅, 1997, 달성광산지역 토양의 중금속함량 분석결과와 평가. 지하수환경, 4, 20-26.
- 김규봉, 이병주, 황상구, 1990, 광주도폭 지질보고서. 한국동력자원연구소, 20 p.
- 김주용, 은고요나, 고영구, 윤석태, 오강호, 김동주, 2001, 전남 나주-영암지역의 영산강 하류 시추퇴적물의 퇴적 환경과 지구화학적 특성. 한국지구과학회지, 22, 301-317.
- 김주용, 정철환, 오강호, 고영구, 문정중, 유경아, 1999, 광주부근 영산강과 광주천의 하상퇴적물의 중금속 오염. 한국지구과학회지, 20, 96-100.
- 문지원, 이상훈, 문희수, 2000, 안양천 바닥 퇴적물의 지구화학적 특성에 따른 하천수 오염영향. 자원환경지질, 33, 205-215.
- 박영석, 노영배, 이창신, 1995, 광주-나주 지역에 분포하는 화강암류에 대한 Rb-Sr 동위원소연구. 한국지구과학회지, 16, 247-261.
- 박천영, 정연중, 강지성, 2000, 화순 폐탄광지역 광산배수와 침전 및 증발잔류광물에 대한 지구화학적 및 광물학적 연구. 자원환경지질, 33, 391-404.
- 박천영, 정연중, 김성구, 2001, 광양 폐광암 수계에 형성된 철수산화물에 대한 광물학적 및 지구화학적 특성. 한국지구과학회지, 22, 208-222.
- 박춘식, 1996, 풍화토의 특성. 도서출판 엔지니어즈, 서울, 232 p.
- 송기관, 2001, 영산강수계 영양염류 변화추이 분석에 관한 연구. 전남대학교 석사학위논문, 44 p.
- 송재성, 1997, 영산강 상류 수계의 수질변화에 관한 연구. 전남대학교 석사학위논문, 44 p.
- 수자원공사, 1992, 전국하천조사서.
- 신상은, 강석범, 고영구, 박배영, 윤석태, 김주용, 오강호, 2002, 한반도 남서해안 상부조간대의 퇴적상 및 지구화학적 특성. 한국지구과학회지, 23, 722-735.
- 오강호, 고영구, 김주용, 김혜경, 2002, 화순천의 퇴적환경 및 퇴적물과 하천수의 지구화학적 특성. 한국환경과학회지, 11, 881-895.
- 오대균, 김정엽, 전효택, 1995, 동해탄광주변 산성광산 폐수

- 와 하상퇴적물의 지구화학. *자원환경지질*, 28, 213-220.
- 옥치상, 이주상, 박홍석, 백병천, 이병인, 1999, 수질 및 수자원 관리. 도서출판 대학서림, 서울, 606 p.
- 위현정, 1997, 영산강 하류 유역에 분포하는 유기물층에 관한 연구. *전남대학교 석사학위논문*, 35 p.
- 유환수, 조석희, 고영구, 2000, 섬진강 유역의 하성 퇴적층에 관한 연구. *한국지구과학회지*, 21, 174-187.
- 윤희신, 2000, 영산강 목표 수질을 위한 BOD 오염부하량 삭감. *서울대학교 석사학위논문*, 38 p.
- 은고요나, 1998, 영산강 유역의 제4기 퇴적층의 퇴적환경과 지화학적 연구. *전남대학교 박사학위논문*, 203 p.
- 이성은, 김규한, 이진수, 전호택, 2002, 탄천의 하상퇴적물과 하천수내 주요 용존 이온과 중금속의 수리지구화학적 특성과 오염. *자원환경지질*, 35, 25-41.
- 이종현, 이정석, 김범수, 이창복, 고철환, 1998, 경기만 퇴적물의 중금속 분포 특성. *바다*, 3, 103-111.
- 이평구, 박성원, 염승준, 2001, 공주 금호매립지의 중간복토재 및 차수재(노토양)의 중금속 오염과 존재형태 연구. *자원환경지질*, 34, 283-299.
- 이평구, 이재영, 1997, 프랑스 A-71 고속도로변 Retention pond의 기능평가. *한국토양환경학회지*, 2, 73-81.
- 이찬희, 이현구, 윤경무, 2001, 토현광산 수계에 분포하는 토양과 퇴적물의 지구화학적 특성, 이차적오염 및 중금속의 거동. *자원환경지질*, 34, 39-53.
- 전라남도, 1996, 영산강 수질개선 종합대책 수립에 관한 연구. 668 p.
- 전호택, 김주용, 최시영, 1998, 폐 석탄광 주변 지구화학적 환경의 중금속 오염 평가-강릉탄전 임곡천 일대를 중심으로-. *자원환경지질*, 31, 499-508.
- 전호택, 황지호, 1998, 폐 석탄광 주변 지구화학적 환경의 중금속 오염 평가-도계탄광 부근 수계에서의 산성광산배수의 지구화학-. *한국자원공학회지*, 35, 491-500.
- 정부합동, 2000, 호남의 생명수 지키기 대역사 -영산강수계 물관리종합대책-. 환경부 483 p.
- 조영길, 김주용, 1998, 영산강 하상퇴적물의 중금속 함량. *한국환경과학회지*, 7, 281-290.
- 차진명, 신성의, 차규석, 1999, 영산강 수계의 비점오염원에 관한 연구 I -토지이용 및 강우를 중심으로-. *환경영향평가*, 8, 41-49.
- 황대호, 2001, 영산강 수질기준 달성을 위한 BOD 부하량 삭감방법의 비교 연구. *서울대학교 석사학위논문*, 65 p.
- Adriano, D.C., 1986, Trace Elements in the Terrestrial Environment. Springer-Verlag, Berlin, 533 p.
- Alloway, B.J., Thornton, I., Smart, G.A., Sherlock, J.C., and Quinn, M.J., 1988, Metal Availability. *Science of The Total Environment*, 75, 41-69.
- Aston, S.R., Thornton, I., Webb, J.S., Purves, J.B., and Milford, B.L., 1974, Stream sediment composition, an aid to water quality assessment. *Water Air and Soil Pollution*, 3, 321-325.
- Berner, E.K. and Berner, R.A., 1987, The global water cycle. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New York, 397 p.
- Bruland, K.W., Bertine, K., Koide, M., and Goldberg, E.D., 1974, History of metal pollution in southern California coastal zone. *Environmental Science and Technology*, 8, 425-432.
- Folk, R.L., 1968, Petrology of Sedimentary Rock. Hemphill's, Austin, Texas, 170 p.
- Folk, R.L. and Ward, W.C., 1957, Brazos river bar; a study in the significance of grain size parameter. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 3-27.
- Förstner, U. and Wittmann, G.T.W., 1981, Metal Pollution in the Aquatic Environment. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 486 p.
- Galehouse, J.S., 1971, Sedimentation analysis, In Carver, R.E.(ed.), *Procedures in Sedimentary Petrology*. Wiley-Interscience, New York, 69-94.
- Horowitz, A.J., 1991, A Primer on Sediment-Trace Element Chemistry. Lewis Publishers, Chelsea(MI), 136 p.
- Huisman, D.J., Vermeulen, F.J.H., Baker, J., Veldkamp, A., Kroonenberg S.B., and Klaver, G.Th., 1997, A geological interpretation of heavy metal concentrations in soil and sediments in the southern Netherlands. *Journal of Geochemical Exploration*, 59, 163-174.
- Ingram, R.L., 1971, Sieve analysis, In Carver, R.E.(ed.), *Procedures in Sedimentary Petrology*. Wiley-Interscience, New York, 49-68.
- Irving, H. and Williams, R., 1948, Order of stability of metal complexes. *Nature*, 162, 746-747.
- Krauskopf, K.B., 1982, Introduction to Geochemistry. McGraw-Hill, New York, 617 p.
- Mason, B. and Moore, C.B., 1982, Principles of Geochemistry. John Wiley & Sons Inc, New York, 344 p.
- Miall, A.D., 1977, A review of the braided river depositional environment. *Earth Science Review*, 13, 1-62.
- Müller, G., 1979, Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins-Verderungen seit. *Umschau*, 79, 778-783.
- Salomons, W. and Förstner, U., 1984, Metals in the Hydrocycle. Springer-Verlag, Berlin, 349p.
- Strickland, J.D.H. and Parsons, T.R., 1972, A Practical Handbook of Seawater Analysis. Fishery Research Board of Canada, Ottawa, 207-211.
- Thornton, I., 1983, Applied Environmental Geochemistry. Academic Press, London, 501 p.
- Wittmann, G.T.W., 1983, Metal Pollution in the Aquatic Environment. Springer-Verlag, Berlin, 486 p.