

연구논문

영산강 하류권역 하상퇴적물의 지화학적 특성과 오염평가

윤석태 · 고영구 · 오강호 · 문병찬 · 김해경*

전남대학교 과학교육학부/ 과학교육연구소, 광주교육대학교 과학교육과*

(2004년 7월 22일 접수, 2004년 10월 14일 승인)

Geochemical Characteristics and Contamination Assessment of Surface Sediments in Lower Yeongsan River System

Seok-Tai Youn · Yeong-Koo Koh · Kang-Ho Oh · Byoung-Chan Moon · Hai-Gyoung Kim*

Department of Science Education/ Institute of Science Education, Chonnam National University

Department of Science Education, Gwangju National University of Education*

(Manuscript received 7 July 2004; accepted 14 October 2004)

Abstract

In order to investigate the geochemical characteristics of surface sediments in lower Yeongsan river system, sediment samples from the main stream of Yeongsan river, Gomakwon and Hampyeong streams 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 are mainly dependent on grain size of the sediments, geology around the streams and organic matter contents from the domestic sewage. Enrichment factor (EF) representing the degree of metal contamination in the sediments are relatively low in the study area. But, high Zn and Pb values seem to be from the study area, partly.

Key words : geochemical characteristics, contamination, surface sediments, Yeongsan river

I. 서론

물은 생활용수, 농업용수, 산업용수 등 인간생

활에 필요한 자원으로, 인간 활동과 밀접한 관계를 이루고 있다. 특히, 하천의 물은 지구적 순환 과정에서 토양과 암석을 풍화·침식시켜 지형의

변화를 초래하며 인간활동의 부산물인 오염물질을 이동시키기도 한다(윤석태 등, 2003; Berner and Berner, 1987). 하천으로부터 유입되는 다양한 유해물질들은 수중생태계 및 하상에 퇴적되는 퇴적물을 오염시켜 수중 환경을 비롯한 전 지구적인 환경에 변화를 가져온다. 하천 오염에 대한 환경학적 연구들은 수질을 주 대상으로 활발하게 진행되고 있다. 그러나 하천환경을 전체적으로 이해하기 위해서는 수질뿐만 아니라 하상에 집적되는 퇴적물 내의 중금속들을 비롯한 지화학적 성분들의 거동을 살피는 것이 중요하다. 단기간에 걸친 하천환경의 특성변화를 반영하는 수질과 달리, 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 연구는 광산활동 등에 의한 탄광 주변 산성광산배수의 오염 정도를 파악하기 위해 활발히 진행되고 있으나(김경웅, 1997; 이찬희 등, 2001; 전효택 등, 1998), 강과 하천의 하상퇴적물을 대상으로 한 연구는 상대적으로 희소한 실정이다(문지원 등, 2000; 이성은 등, 2002; 오강호 등, 2003a, 2003b).

전라남도 서남단에 위치하는 영산강은 공업화의 직접적 영향이 상대적으로 적은 하천임에도 불구하고 수질이 4대강 중 가장 악화된 것으로 나타나 환경적 영향요인에 대한 연구의 필요성이 증대되고 있다. 특히, 2002년에 입법 예고된 영산강 특별법에 의해 오염총량제, 수변구역 지정, 물이용부담금 부과 등의 정책적인 연구가 활발히 진행되고 있다. 영산강권역에 대한 선행연구로는 광주·전남의 수자원 확보, 수질보존, 관리 및 개

선 등에 관한 연구(광주광역시, 1996; 전라남도, 1996; 정부합동, 2000) 등의 정책연구와 수질환경에 관한 이화학적 연구(차진명 등, 1999; 황대호, 2001; 윤석태 등, 2003) 등이 이루어진 바 있다. 그러나 퇴적환경 및 하상퇴적물 중에 함유된 중금속분들의 지구화학적 특성 및 오염에 관한 연구들은 상대적으로 저조한 실정이다(오강호 등, 2003a, 2003b; 조영길·김주용, 1998). 따라서 본 연구에서는 영산강 하류권역에 위치한 영산강 본류 및 고막원천, 함평천에서 채취된 퇴적물을 대상으로 지구화학적 특성과 거동을 규명하는 한편, 유해 중금속들의 실태와 그 원인에 대하여 해석을 시도하였다.

II. 연구지역 개요

1. 유역의 지형

한반도 서남단에 위치하는 영산강은 전형적인 곡류천으로 노령산맥을 중심으로 남남서 방향의 수지상 하계망을 이루고 있다. 영산강은 유역면적 3,371km², 하천연장 1,472km, 본류의 유로연장 136km로서 우리나라 4대강 중의 하나로 황룡강, 광주천, 지식천, 고막원천, 함평천 등 5개의 제1차 지류들을 포괄한다. 영산강 하계권역은 중류의 나주시 영산포 일대를 기준으로 황룡강, 지식천, 광주천을 포함하는 상류권역과 고막원천, 함평천을 포함하는 하류권역으로 크게 나누어진다(정부합동, 2000). 영산강 하류권역에 해당하는 고막원천은 장성군 삼서면 학성리 태청산에서 발원하여 함평군 해보면과 나산면, 나주시 고막원을 지나 남쪽으로 흘러 다시면 동당리 석관정 서쪽에서 영산강 본류와 합류한다(Figure 1). 고막원천은 직할하천 21.4km를 포함한 유로연장 39.3km로 유역면적은 218.99km²이다. 함평천은 영광군 군남면 대덕리 금산에서 발원하여 대동댐을 지나 함평읍을 비롯한 함평군을 통과하여 학교면 사포나루

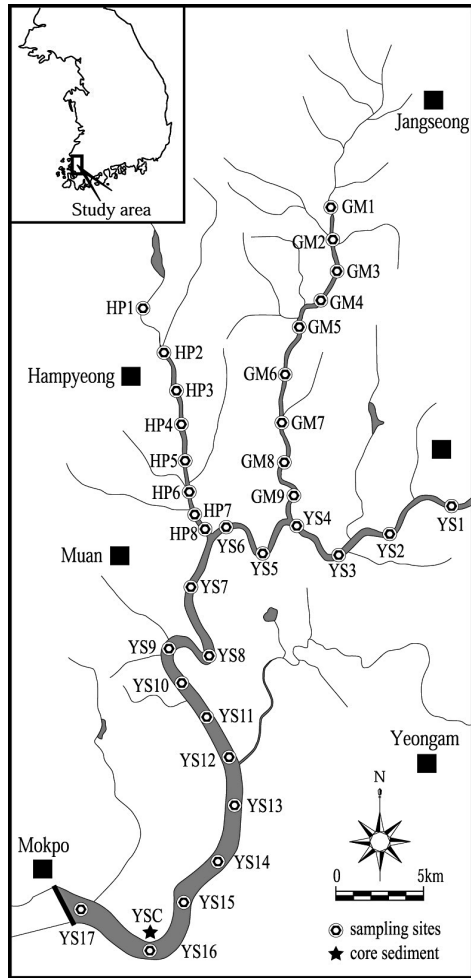


Fig. 1 Map showing the study area and sampling sites(YS : Yeongsanriver main stream, GM : Gomakwon stream, HP : Hampyeong stream, YSC: Yeongsan river core site).

서측에서 분류와 함유한다. 함평천은 직할하천 15.0km를 비롯한 유로연장 32.0km로 유역면적은 186.97km²이다(수자원공사, 1992).

2. 유역의 지질

연구지역인 영산강 하류권역의 지질은 선캄브리아기의 화강편마암류, 중생대의 화강암류, 퇴적

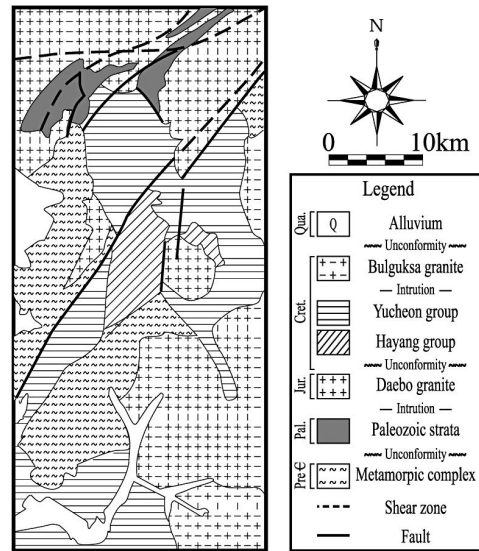


Fig. 2 Geological map of the study area(modified after ; MOST, 1997).

암류, 화산암류, 신생대 제4기 충적층으로 구성되어 있다(Figure 2). 선캄브리아기 화강편마암류는 가장 고기의 지층으로 함평군 서부 지역과 무안 지역에 넓게 분포하며, 고생대 퇴적암류는 영광군 남부지역과 장성군 삼서면 지역에 협소하게 분포하고 있다. 중생대 쥐라기 화강암류인 대보화강암에 대비되는 광주화강암은 흑운모화강암으로 영광군, 영광군, 장성군 지역에 광역적으로 분포한다. 이 화강암류는 영산강 유역에서 큰 저반상 화강암으로 영산강 중류에 폭 15~20km, 연장 40km 내외, 높이 100m 내외의 높은 구릉지를 형성한다.

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 연구지역의 중심부인 함평군, 나주시 일대와 영산강 하구연의 목포시 부근에서 주로 노출된다. 화산쇄설성 퇴적암류로는 응회암질 사암과 셰일 등이 부분적으로 협재

되며 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).

III. 재료 및 방법

본 연구는 영산강 하류권역을 대상으로 전라남도 하천도와 1:50,000의 지형도를 참고하여, 영산강 본류, 고막원천, 함평천에서 총 34 개 하상퇴적물을 채취하였다. 하상퇴적물의 채취는 소형 모터보트를 이용하여 라폰 형(La-Pond type) 채니기로 유로를 따라 약 3~4km 간격으로 채취하였으며, 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, 채니기의 중심 부분만을 따로 채취하여 사용하였다.

퇴적물의 입도분석은 Ingram(1971)과 Galehouse(1971)의 방법에 따라 유기물과 탄산염을 제거한 후, 사질 퇴적물은 표준체를 이용한 건식체질(dry sieving) 방법으로, 니질 퇴적물은 침전속도를 이용한 피펫법(pipetting method)으로 퇴적물의 입도별 함량을 구하였다. 한편, 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 이용하여 퇴적물의 유형을 분류하였다.

지구화학적 분석을 위한 표준퇴적물 시료는 70 $^{\circ}$ C 이하로 건조기에서 충분히 건조시킨 후, 200 mesh 이하의 크기로 분말화하여 주성분 원소, 미량원소 분석, 유기탄소 함량 분석의 시료로써 사용하였다. 지화학 분석은 영국 London 대학의 Royal Holloway and Bedford New College에 의뢰

하여 주성분 원소 Al, Fe, Mg, Ca, Na, K, Ti, P, Mn 9종과 미량원소 Ba, Co, Cr, Li, Nb, Ni, Sc, Sr, V, Y, Zn, Zr, Pb, Cd 14종의 총 23종 원소를 유도 결합플라즈마방출분광기(ICP-AES)를 이용하여 분석하였다. 원소의 분석 시, 자료의 신뢰도를 검증하기 위해 미국표준기술연구소(NIST)의 하상 퇴적물 표준시료(RM 8704; Buffalo river sediment)와 동일시료에 대한 중복분석을 실시하였다. 그 결과 표준시료에 대한 상대오차인 정확도와 동일시료의 중복분석에 의한 정밀도는 $\pm 10\%$ 이내로 나타났다.

유기탄소의 함량분석을 위해서는 약 0.1 g의 분말시료에 일정량의 중크롬산칼륨($K_2Cr_2O_7$)과 황산을 혼합한 산화제 용액을 과량으로 넣어 시료 중의 유기탄소를 산화시키고 남은 양을 황산암모늄제II철($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$)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.

IV. 결과 및 토의

1. 퇴적물 입도 및 퇴적상

연구지역에서 하상퇴적물의 입도분포를 보면, 고막원천 및 함평천의 상부 지역에서 역을 포함한 사질퇴적물이 우세하다. 하천에 따른 퇴적물들의 평균입도는 영산강 본류에서 $-2.47 \sim 7.43\phi$ (평균 3.10ϕ), 고막원천에서는 $-0.28 \sim 7.26\phi$ (평균 2.46ϕ), 그리고 함평천에서는 $-0.12 \sim 7.08\phi$ (평균 3.01ϕ)의 범위로 잔자갈에서 니질 크기까지 다양하다. 이들 입도들의 평균은 조립사(coarse sand)에 해당하며, 입도 변화는 전반적으로 단일모드

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

		Gravel(%)	Sand(%)	Silt(%)	Clay(%)	Mean (Mz;φ)	Sorting (σ;φ)	Skewness (SKI)	Kurtosis (KG)
YS ^a	Min.	0.00	1.73	0.00	0.38	-2.47	0.92	-0.25	0.73
	Max.	81.09	87.76	79.00	38.14	7.43	4.15	0.64	3.05
	Aver.	6.91	22.96	47.14	22.98	5.15	1.94	0.15	1.12
	SD	19.75	30.33	28.35	11.78	3.10	0.69	0.26	0.53
GM ^b	Min.	0.00	5.09	0.00	2.09	-0.28	1.21	-0.23	0.86
	Max.	26.08	82.03	67.92	26.98	7.27	2.93	0.60	2.42
	Aver.	9.34	60.64	19.86	10.16	2.62	2.04	0.19	1.56
	SD	10.70	24.43	23.83	7.01	2.46	0.59	0.28	0.51
HP ^c	Min.	0.00	0.83	0.00	5.16	-0.15	0.62	-0.12	0.97
	Max.	37.42	94.33	76.82	29.41	7.08	4.14	0.51	1.71
	Aver.	14.98	45.28	26.95	12.80	3.01	2.56	0.17	1.19
	SD	15.03	30.40	28.60	8.44	2.63	1.15	0.20	0.25

(^aYeongsan main stream sediments, ^bGomakwon stream sediments, ^cHampyeong stream sediments)

적(unimodal)이다. 분급도는 분류에서 0.92~4.15φ, 고막원천 1.21~2.93φ, 함평천 0.62~4.14φ로 매우 불량한 분급(extremely poorly sorted)으로 나타났다. 퇴적물의 왜도는 전반적으로 양성왜도로 편향되며, 매우 조립한 왜도(very coarse skewed)에서 세립한 왜도(fine skewed)에 이르는 광범위한 분포를 보였다(Table 1).

연구지역 표층퇴적물의 유형을 구분하기 위해 입도별 중량비를 구하여 Folk(1968)의 방법에 따라 삼각도에 도시하여 퇴적물들을 분류하였다

(Figure 3). 영산강 분류 퇴적물은 역질사(gS), 역함유니질사((g)mS), 역(G), 실트(Z), 사질니(sM), 니(M), 사질실트(sZ)의 7개 퇴적상으로 구분되었다. 고막원천에서는 역질사(gS), 역니질사(gmS), 역함유니질사((g)mS), 사질실트(sZ), 니질사(mS), 실트(Z)의 6개 퇴적상으로, 함평천에서는 니사질역(msG), 역질니(gM), 역니질사(gmS), 역함유사((g)S), 실트(Z)의 5개 퇴적상으로 구분되었다.

표층퇴적물의 입도 및 퇴적상의 변화는 하천의 하상경사를 비롯한 지형상의 특성, 유속과 유량의

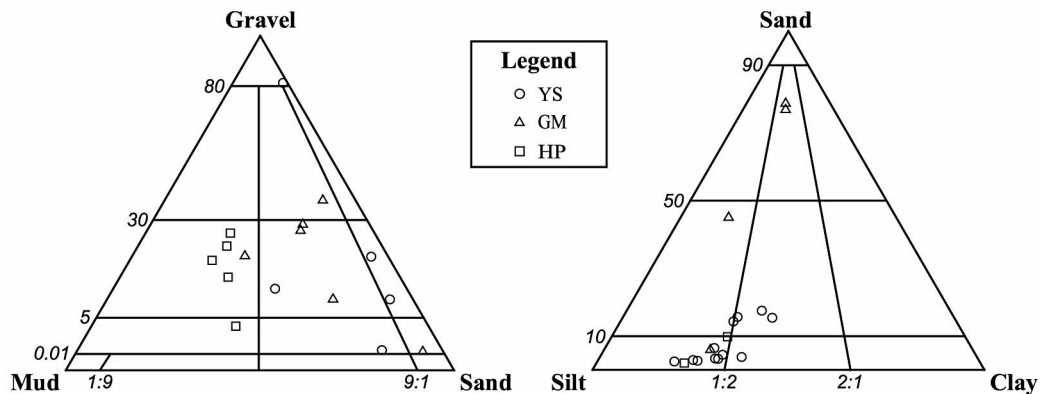


Fig. 3 Triangular diagrams showing sediment types.

변화, 주변 지질을 구성하는 암석의 성분 및 기후 등이 퇴적물의 공간적 변화의 요인으로 작용한다 (Miall, 1977; 김주용 등, 2001). 고막원천과 함평천의 상부는 지형적 요인에 의해 비교적 하상경사가 크며, 하천의 일부 구간에는 수질 정화 및 유량확보를 위한 보(dammed pool) 등의 인공 구조물들이 설치되어 있다. 이러한 하상경사와 인공구조물들은 유속에 큰 변화를 주기도 하며, 일시적인 정체를 가져오기도 한다. 그러나 고막원천, 함평천의 하부와 영산강 본류는 유역의 하부에 위치한 관계로 하상경사가 완만하고, 지형적으로 하천이 곡류함으로써 유속의 감소를 가져온다. 이런 관점에서 볼 때, 연구지역에 분포하는 퇴적물의 입도분포가 광범위한 것은 유속의 변화, 인공구조물들에 의한 간섭현상과 함께 지형적 요인 등이 복합적으로 작용한 결과로 판단된다.

2. 금속 원소들의 함량 분포

하상퇴적물을 대상으로 분석한 금속 원소들의 함량 분포를 살펴보기 위하여, 은고요나(1998)에 의해 조사된 연구지역의 인근 시추퇴적물(YS : YS core mean value)과 Mason & Moore(1982)에 의해 제시된 지각평균치(MC : mean crust value)와 상호 비교하였다(Table 2, 3). 연구지역의 하상퇴적물에 함유된 주성분원소들의 함량분포는, 인근 시추퇴적물의 평균 함량과 비교할 때, 영산강 본류에서 Al, Fe, K, Ti, P, Mn과 고막원천에서 K, 함평천에서 Ca, Mn 등이 높게 나타났다(Figure 4). 그러나 지각평균치와의 비교에서는 대다수의 주성분원소들이 낮은 값을 보였으며, 고막원천에서 K만이 평균 2.77 %로 지각평균함량보다 높게 나타났다.

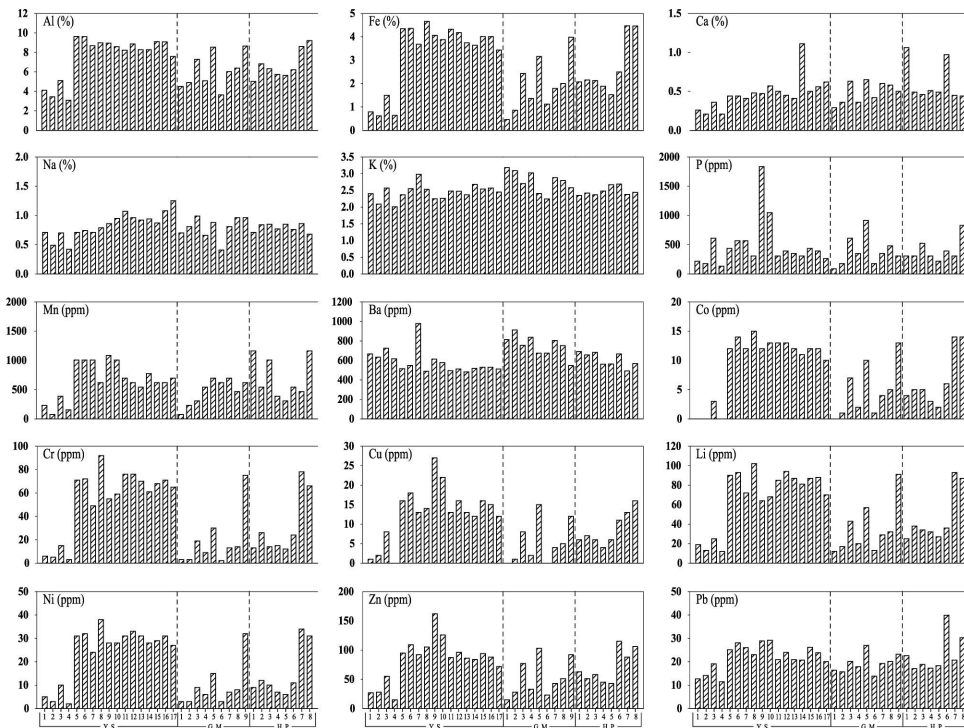


Fig. 4 Variations of metal contents in the study area.

Table 2. Major element contents of the surface sediments in the study area(unit in %, *ppm).

		Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	Ti*	P*	Mn*
YS	Min.	3.09	0.62	0.09	0.21	0.42	2.01	779	131	77
	Max.	9.64	4.66	1.41	1.11	1.25	2.98	4376	1833	1084
	Aver.	7.63	3.29	0.86	0.47	0.83	2.45	3304	490	656
	SD	2.20	1.42	0.44	0.20	0.21	0.22	1274	406	311
GM	Min.	3.64	0.46	0.08	0.29	0.41	2.24	1499	87	77
	Max.	8.64	3.98	1.13	0.65	0.99	3.18	4376	916	697
	Aver.	6.11	1.91	0.37	0.49	0.80	2.77	2751	383	473
	SD	1.77	1.13	0.33	0.13	0.19	0.32	972	257	221
HP	Min.	5.02	1.52	0.24	0.44	0.68	2.35	1858	218	310
	Max.	9.21	4.47	1.07	1.06	0.86	2.69	4376	829	1162
	Aver.	6.70	2.65	0.51	0.61	0.79	2.48	2930	398	697
	SD	1.47	1.15	0.30	0.25	0.07	0.13	941	196	354
YSC ^a		7.15	3.11	0.93	0.58	1.30	2.44	3200	404	623
MC ^b		8.13	1.82	2.09	3.63	2.83	2.59	4400	1050	950

(^aYS core mean value, ^bMean crust value; modified after, ^aEun, 1998; ^bMason and Moore, 1982)

미량원소들의 평균 함량 분포는, 인근 시추퇴적물과의 비교할 때, Ba, Zn, Zr, Pb가 높게 나타났으며, Li, Sr 등 일부 원소가 하천에 따라 높은 값을 보였다. 또한, 시추퇴적물과의 비교에서 높게 나타난 이들 원소들은 지각평균치와의 비교에서도 높은 값을 보였다.

3. 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).

Table 3. Minor elements, mean grain size and organic carbon contents of the surface sediments in the study area(unit in ppm, * ϕ , **%).

		Ba	Co	Cr	Cu	Li	Ni	Sc	Sr	V	Y	Zn	Zr	Pb	Cd	Mz*	OC**
YS	min	483	0	3	0	12	2	2	106	10	5	15	86	11	<1	-2.47	0.04
	max	978	15	92	27	102	38	16	147	106	25	162	360	29	<1	7.43	1.68
	aver	585	10	54	13	68	24	11	128	69	18	84	144	22	<1	5.15	0.62
	SD	122	5	28	7	31	11	5	11	32	7	37	96	5	-	3.10	0.41
GM	min	547	0	2	0	12	3	2	132	13	5	15	101	14	<1	-0.28	0.11
	max	912	13	75	15	91	32	14	210	89	21	103	261	27	<1	7.27	1.50
	aver	752	5	19	5	35	10	5	174	39	11	52	185	19	<1	2.62	0.57
	SD	108	4	23	5	26	9	4	25	25	5	32	58	4	-	2.46	0.43
HP	min	492	2	12	4	25	6	5	114	33	9	43	92	17	<1	-0.15	0.29
	max	690	14	78	16	93	34	14	158	90	24	115	267	40	<1	7.08	1.63
	aver	610	7	31	9	47	15	8	131	53	15	71	185	23	<1	3.01	0.89
	SD	73	5	26	4	27	11	4	14	24	5	28	61	8	-	2.63	0.52
YSC		525	11	67	13	53	28	11	137	70	20	50	63	14	-	-	-
MC		425	25	100	55	20	75	22	375	135	33	70	165	13	0.1	-	-

Table 4. Correlation matrix in the study area.

	Al	Fe	Mg	K	P	Mn	Ba	Co	Cr	Cu	Li	Ni	Sr	Zn	Zr	Pb	Mz	OC
Al	1.00																	
Fe	0.96	1.00																
Mg	0.90	0.96	1.00															
K	-0.02	-0.17	-0.16	1.00														
P	0.47	0.42	0.23	-0.21	1.00													
Mn	0.62	0.65	0.50	-0.18	0.56	1.00												
Ba	-0.48	-0.59	-0.67	0.61	-0.02	-0.17	1.00											
Co	0.96	0.99	0.95	-0.14	0.42	0.62	-0.55	1.00										
Cr	0.90	0.96	0.99	-0.17	0.24	0.49	-0.68	0.96	1.00									
Cu	0.89	0.89	0.80	-0.24	0.72	0.66	-0.50	0.89	0.81	1.00								
Li	0.94	0.97	0.98	-0.13	0.26	0.52	-0.63	0.97	0.99	0.82	1.00							
Ni	0.91	0.97	0.98	-0.18	0.32	0.55	-0.65	0.97	0.99	0.85	0.98	1.00						
Sr	-0.17	-0.31	-0.35	0.63	0.02	-0.19	0.59	-0.28	-0.40	-0.27	-0.36	-0.41	1.00					
Zn	0.86	0.87	0.75	-0.19	0.72	0.67	-0.43	0.87	0.76	0.96	0.77	0.79	-0.20	1.00				
Zr	-0.93	-0.90	-0.87	-0.11	-0.37	-0.58	0.42	-0.90	-0.86	-0.80	-0.88	-0.87	0.08	-0.77	1.00			
Pb	0.68	0.67	0.51	0.03	0.56	0.62	-0.20	0.66	0.53	0.77	0.55	0.56	-0.06	0.86	-0.62	1.00		
Mz	0.94	0.94	0.93	-0.08	0.39	0.49	-0.62	0.94	0.94	0.85	0.95	0.94	-0.22	0.79	-0.92	0.54	1.00	
OC	0.58	0.58	0.40	-0.26	0.74	0.70	-0.23	0.59	0.40	0.69	0.44	0.46	-0.02	0.71	-0.50	0.70	0.49	1.00

연구지역에서 금속원소들의 함량변화를 보면, Al, Fe, Mg, Co, Cr, Li, Ni 등의 많은 금속원소들은 퇴적물의 평균 입도와 $r=0.9$ 이상의 높은 상관성을 보이며, 입도의 세립화에 따라 증가하는 경향을 보였다(Table 4). 이들 금속원소들은 주로 입도 및 점토광물의 주성분 원소들과 밀접한 관련성을 보여, 입도의 세립화에 따른 알루미늄-규산염 광물의 영향이 일부 작용하고 있음을 시사한다(오강호 등, 2003b; Krauskopf, 1982). 또한, 유기물과 금속원소와의 상관관계는 P, Mn, Cu, Zn, Pb가 $r=0.7$ 내외의 비교적 높은 상관성을 보이며, 유기물의 함량 변화에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 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 등, 2003b). 이는 연구지역에서 금속원소들의 함량분포에 생활하수 등에 의한 유기물의 영향이 작용하고 있음을 시사한다.

한편, 퇴적물 내의 금속원소들의 거동에 영향을 주는 요인들을 종합적으로 살펴보기 위하여 주성분분석법(PCA : Principal components analysis)을 이용하여 요인분석(Factor analysis)을 실시하였으며, 결과의 해석을 용이하게 하기 위하여 Kaiser 정규화가 된 베리맥스법(varimax)으로 요인행렬을 회전시킨 후 요인을 구하였다. 분석결과 총 4개의 요인이 자료의 총분산에 대하여 90.51%의 설명력을 갖는 것으로 나타났다(Table 5). 요인 1은 전체 자료 분산에 대한 기여율이 54.64%로 Al, Fe, Mg, Ti, Co, Cr, Li, Ni, Sc, V, Y, 평균입도 등이 높은 적재량(factor loading)을 보였다. 이들 변수들은 쇄설성 점토광물 기원의 원소들과 관련이 있는 것으로 보고되어져 있다(이종현 등, 1998). 즉, 연구지역의 주변 암석에서 풍화되어 공급되어진 세립질의 점토광물의 영향을 반영하는 것으로 보여진다. 요인 2는 전체분산에 대한 기여율이 19.59%로 P, Mn, Cu, Zn, Pb, 유기물 등이 높은 적재량을 보였다. P, Mn, Cu, Zn, Pb

Table 5. Factor analysis of variables and factor scores for surface sediments in study area.

Variables	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
Al	0.89	0.42	0.03	0.07
Fe	0.90	0.39	-0.15	0.10
Mg	0.95	0.15	-0.18	0.09
Ca	0.08	0.25	0.07	0.92
Na	0.62	0.03	0.29	0.47
K	0.04	-0.19	0.91	-0.01
Ti	0.91	0.32	0.05	0.12
P	0.12	0.91	0.02	-0.11
Mn	0.34	0.72	-0.12	0.18
Ba	-0.58	0.08	0.70	-0.23
Co	0.90	0.39	-0.11	0.06
Cr	0.95	0.17	-0.21	0.02
Cu	0.71	0.65	-0.15	0.04
Li	0.96	0.20	-0.16	0.03
Ni	0.93	0.25	-0.21	0.01
Sc	0.94	0.26	-0.20	0.07
Sr	-0.25	0.01	0.83	0.30
V	0.94	0.27	-0.15	0.07
Y	0.89	0.40	-0.17	0.10
Zn	0.64	0.71	-0.11	0.14
Zr	-0.88	-0.32	-0.14	-0.14
Pb	0.42	0.69	0.06	0.24
Mz	0.93	0.26	-0.06	0.08
OC	0.27	0.80	-0.09	0.17
Eigenvalue	13.11	4.70	2.45	1.46
% of variation	54.64	19.59	10.22	6.06
Cumulative	54.64	74.23	84.45	90.51

등은 유기물과 친화력이 비교적 높은 원소들로 알려져 있다. 이는 수중환경의 인위적인 오염에 의한 유기물의 증가가 이들 원소들의 함량변화에 작용한 결과로 판단된다. 또한, 요인 3에는 10.22%의 기여율로 K, Ba, Sr 등이 높은 적재량을 보이며, 요인 4에는 6.06%로 Ca가 적재되는 것으로 나타났다. 퇴적물 내의 K와 Ba는 퇴적물 내의 장석류 입자의 산출과 연관성이 있으며, Ca 및 Sr은 탄산염광물과 관계지어 생각해 볼 때 (Bowen, 1979), 주변 육상의 지질과 관련되어 있을 것으로 추정된다.

이와 같이, 퇴적물 내의 금속원소 함량변화는

입도 등의 특정 요인에 의해 결정되기도 하나, 대부분 여러 요인들이 복합적으로 작용함으로써 다양한 함량변화를 가져온다. 즉 연구지역에서 금속원소들의 함량 변화는 입도 및 점토광물의 주 성분 원소들과 밀접한 관련성을 보이며, 생활하수 등에 의한 유기물의 영향, 주변 지질의 영향 역시 작용하고 있음을 시사한다.

4. 금속원소의 오염

퇴적물 내의 금속원소의 오염 또는 인위적인 영향 등을 파악하기 위해서, Bruland *et al.*(1974)에 의한 부화계수(Enrichment Factor: EF)를 구하였다(Table 6). 부화계수는 퇴적물 내 점토광물의 구성비율과 미량원소의 상대적인 함량변화를 이용하여 금속원소 농축평가에 사용된다(김주용 등, 2001; 오강호 등, 2003b). 본 연구에서 부화계수의 보존성원소로는 그 기원이 대부분 지각물질로 알려져 있고, 연구지역에서 상대적으로 함량변화와 편차가 작은 Al을 사용하였으며, 지각 평균값은 Mason and Moore(1982)에 의해 제시된 클라크 농도(clark of concentration)를 사용하였다.

영산강 본류에서 금속원소들의 부화계수는 K 0.77~2.04(평균 1.12), Ba 1.02~3.82(1.71), Li 1.53~4.62(3.36), Zn 0.56~2.10(1.22), Zr 0.45~5.75(1.37), Pb 1.56~2.56(1.87), 고막원천에서는 K 0.89~2.22(1.54), Ba 1.21~3.57(2.58), Li 1.08~4.28(2.10), Zr 0.58~3.33(1.73), Pb 1.68~2.39(2.02), 함평천에서는 K 0.83~1.49(1.21), Ba 1.09~2.63(1.83), Li 1.95~4.39(2.66), Zn 0.87~2.15(1.23), Zr 0.53~2.62(1.48), Pb 1.50~4.01(2.21) 등의 값을 보이는 것으로 나타났다.

$$EF = \frac{\text{Metal}(\text{sediment})/\text{Metal}(\text{crust})}{\text{Al}(\text{sediment})/\text{Al}(\text{crust})}$$

한편, Figure 5는 하천의 잠재적으로 오염을 유발시킬 수 있는 P, Cu, Zn, Pb를 대상으로 농축정도를 효과적으로 파악하기 위해 부화계수를 이용

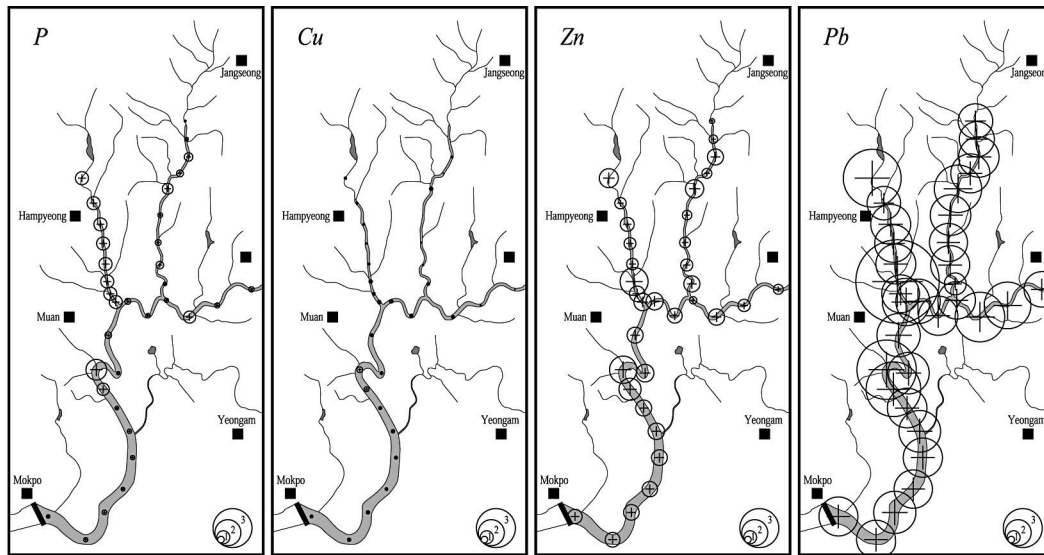


Fig. 5. Spatial distributions of enrichment factor(EF) for P, Cu, Zn and Pb in study area.

Table 6. Enrichment factors(EF) for metals in the study area.

		Fe	Na	K	Ti	P	Mn	Ba	Co	Cr	Cu	Li	Ni	Zn	Zr	Pb
YS	Min.	0.29	0.21	0.77	0.42	0.26	0.19	1.02	0.00	0.08	0.00	1.53	0.07	0.56	0.45	1.56
	Max.	0.86	0.50	2.04	0.93	1.59	1.04	3.82	0.54	0.83	0.45	4.62	0.46	2.10	5.75	2.56
	Aver.	0.65	0.33	1.12	0.77	0.49	0.69	1.71	0.36	0.52	0.23	3.36	0.31	1.22	1.37	1.87
GM	Min.	0.17	0.30	0.89	0.70	0.15	0.15	1.21	0.00	0.04	0.00	1.08	0.07	0.39	0.58	1.68
	Max.	0.75	0.48	2.22	0.94	0.83	1.46	3.57	0.49	0.71	0.26	4.28	0.40	1.40	3.33	2.39
	Aver.	0.47	0.38	1.54	0.82	0.46	0.69	2.58	0.22	0.21	0.10	2.10	0.15	0.91	1.73	2.02
HP	Min.	0.44	0.21	0.83	0.67	0.27	0.46	1.09	0.12	0.17	0.10	1.95	0.12	0.87	0.53	1.50
	Max.	0.84	0.43	1.49	0.94	0.70	1.98	2.63	0.53	0.74	0.26	4.39	0.43	2.15	2.62	4.01
	Aver.	0.62	0.35	1.21	0.80	0.45	0.92	1.83	0.30	0.34	0.18	2.66	0.22	1.23	1.48	2.21

하여 공간적 오염분포도를 나타내었다. 이들 원소들은 환경유해원소로써 널리 알려져 있으며, 하천 바닥에 장기간 체류할 경우 하천의 기능을 저하시켜 수중생물의 생태와 환경을 파괴하는 유해 요인으로 작용할 수도 있다(Aston, 1974; Wittmann, 1983; Horowitz, 1991). 연구지역에서 나타난 상기 금속원소들의 공간적 부화계수의 변화는, P와 Cu의 경우, 하천 전역에 걸쳐 안정적인 것으로 나타났다. 그러나, Zn은 함평천과 고막원천이 본류에 합류하는 하부지역에서 일부 부화되

는 것으로 나타났으며, Pb는 연구지역 전역에 걸쳐 높게 부화되는 특성을 보였다. 유해 금속원소의 오염과 관련하여 산정한 부화계수 및 공간적 변화를 종합한 결과, 연구지역 퇴적물에서 Zn, Pb 등의 유해 중금속 원소의 농축이 일부 진행된 것으로 추정된다.

V. 결론

1. 영산강 하류권역의 영산강 본류, 고막원천,

함평천에서 채취된 퇴적물의 입도분포를 조사한 결과, 퇴적물들의 입도는 평균적으로 조립사에 해당하며, 분급도는 매우 불량하게 나타났다.

2. 연구지역에서 채취한 하상퇴적물 중의 주성 분원소 및 미량성분원소의 함량은 지각평균함량과 인근 영산강 유역 시추퇴적물들에 있어서의 평균함량보다 낮게 나타났으나, 일부 미량원소인 Ba, Zn, Zr, Pb 등의 금속원소들 함량은 높게 나타났다.

3. 요인분석을 통한 금속원소들의 조절요인은 Al, Fe, Mg, Ti, Co, Cr, Li, Ni, Sc, V, Y 등은 입도 및 점토광물과 밀접한 관련성을 보였으며, P, Mn, Cu, Zn, Pb 등은 유기물 함량과 관련성이 높게 나타났다. 또한 K, Ba, Sr, Ca 등의 일부 원소들이 주변 지질의 영향을 반영하는 것으로 나타났다.

4. 유해 중금속원소를 대상으로 부화계수를 산출한 결과, P와 Cu는 연구지역 전역에 걸쳐 안정적인 것으로 나타났다. 그러나, Zn은 함평천과 고막원천이 본류에 합류하는 하부지역, Pb는 연구지역 전역에 걸쳐 높게 부화되는 특성을 보였다. 이는 연구지역 퇴적물에서 Zn, Pb 등의 유해 중금속 원소의 농축이 일부 진행된 것으로 추정된다.

참고문헌

과학기술부, 1997, 광주 지질도폭 설명서 (1:250,000), 과학기술부.
 광주광역시, 1996, 영산강 수질관리 종합대책 수립에 관한 연구, 광주광역시.
 김경용, 1997, 달성광산지역 토양의 중금속함량 분석결과와 평가, 지하수환경, 4, 20-26.
 김주용, 은고요나, 고영구, 윤석태, 오강호, 김동주, 2001, 전남 나주-영암지역의 영산강 하류 시추퇴적물의 퇴적환경과 지구화학적 특성, 한국지구과학회지, 22, 301-317.
 문지원, 이상훈, 문희수, 2000, 안양천 바닥 퇴적물

의 지구화학적 특성에 따른 하천수 오염 영향, 자원환경지질, 33, 205-215.
 수자원공사, 1992, 전국하천조사서, 수자원공사.
 오강호, 고영구, 윤석태, 2003a, 화순지역 토양-퇴적물-하천수의 지구화학적 특성, 환경영향평가, 12, 9-22.
 오강호, 김주용, 고영구, 윤석태, 신상은, 박배영, 문병찬, 김해경, 2003b, 광주광역시 하천의 표층퇴적물에 대한 지구화학적 특성과 오염, 한국지구과학회지, 24, 346-360.
 윤석태, 고영구, 오강호, 문병찬, 김해경, 2003, 영산강 하류권역 하천수의 수질평가, 환경영향평가, 12, 259-270.
 은고요나, 1998, 영산강 유역의 제4기 퇴적층의 퇴적환경과 지화학적 연구, 전남대학교 박사학위논문.
 이성은, 김규한, 이진수, 전효택, 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.
 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, 전라남도.
 전효택, 김주용, 최시영, 1998, 폐 석탄광 주변 지구화학적 환경의 중금속 오염 평가 -강릉 탄전 임곡천 일대를 중심으로-, 자원환경지질, 31, 499-508.
 정부합동, 2000, 호남의 생명수 지키기 대역사 -영산강수계 물관리종합대책-, 환경부.
 조영길, 김주용, 1998, 영산강 하상퇴적물의 중금속 함량, 한국환경과학회지, 7, 281-290.

- 차진명, 신성의, 차규석, 1999, 영산강 수계의 비점 오염원에 관한 연구 I -토지이용 및 강우를 중심으로-, 환경영향평가, 8, 41-49.
- 황대호, 2001, 영산강 수질기준 달성을 위한 BOD 부하량 삭감방법의 비교 연구, 서울대학교 석사학위논문.
- Adriano, D.C., 1986, Trace Elements in the Terrestrial Environment, Springer-Verlag, Berlin.
- 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.
- Bowen, H.J.M., 1979, Environmental Chemistry of the elements, Academic Press, London.
- 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. and Ward, W.C., 1957, Brazos river bar; a study in the significance of grain size parameter, Journal of Sedimentary Petrology, 27, 3-27.
- Folk, R.L., 1968, Petrology of Sedimentary Rock, Hemphill's, Austin, Texas.
- Förstner, U. and Wittmann, G.T.W., 1981, Metal Pollution in the Aquatic Environment, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- 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).
- Ingram, R.L., 1971, Sieve analysis, in Carver, R.E.(ed.), Procedures in Sedimentary Petrology, Wiley-Interscience, New York.
- 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.
- Mason, B. and Moore, C.B., 1982, Principles of Geochemistry, John Wiley & Sons Inc, New York.
- Miall, A.D., 1977, A review of the braided river depositional environment, Earth Science Review, 13, 1-62.
- Salomons, W. and Förstner, U., 1984, Metals in the Hydrocycle, Springer-Verlag, Berlin.
- 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.
- Wittmann, G.T.W., 1983, Metal Pollution in the Aquatic Environment, Springer-Verlag, Berlin.