

상류수계 영산강 하상퇴적물의 지화학적 특성과 오염

오강호[†] · 김주용* · 고영구 · 윤석태 · 서구원* · 박배영* · 신상은* · 김해경**

전남대학교 과학교육학부

*전남대학교 지구환경과학부

**광주교육대학교 과학교육과

Geochemical Characteristics and Contamination of Surface Sediments in Upper Yeongsan River System

Kang-Ho Oh[†] · Joo-Yong Kim* · Yeong-Koo Koh · Seok-Tai Youn ·
Goo-Won Seo* · Bae-Young Park* · Sang-Eun Shin* · Hai-Gyoung Kim**

Department of Science Education, Chonnam National University

*Department of Earth systems and Environmental Science, Chonnam National University

**Department of Science Education, Gwangju National University of Education

(Received 6 May 2005, Accepted 28 June 2005)

Abstract

In order to investigate the geochemical characteristics of surface sediments in streams of upper Yeongsan River drainage system, sediment samples from the main stream of Yeongsan river, Hwangryong river, Gwangju and Jiseok streams were collected and analyzed for grain size and metal and organic carbon contents. The metal contents in the sediments are mainly dependent on organic matter contents in the domestic sewage, grain size of the sediments and geology around the streams. Enrichment factor (*EF*) and index of geoaccumulation (*I_{geo}*) representing the degree of metal contamination in the sediments are relatively low in the main stream of Yeongsan river main stream, Hwangryong river and Jiseok stream. However, those of Gwangju stream show the *EF* maximum values of P=8.30, Cu=5.55, Zn=14.29 and Pb=7.45 and the *I_{geo}* maximum values of P=3.58, Cu=4.43, Zn=3.22 and Pb=1.59.

keywords : Yeongsan river system, Surface sediment, Geochemical characteristics, Enrichment factor, Index of geoaccumulation

1. 서 론

UN이 2003년을 세계 물의 해(International Year of Freshwater)로 선포할 정도로 세계적으로 물 문제는 심각한 수준에 이르렀으며, 우리나라의 물 관리 여건 또한 매우 어려운 실정으로 물 부족 국가로 분류된다(환경부, 2003). 또한, 현대사회에서 물 부족 문제는 고도의 산업화 성장으로 인한 생활하수, 산업폐수 등의 수질오염 문제로 확대되고 있으며, 인구 증가와 집중, 생활수준 향상으로 인한 가정 하수량의 증가, 기업형 축산의 증가로 따른 축산 폐수 및 세균에 의한 오염 등이 수질오염을 가중시키고 있다. 이러한 물 문제는 공공의 자원으로 사회적으로도 큰 파급을 주기에 정부는 2002년에 3대강 특별법을 발효해 3대강의 수질을 보호하고, 맑은 수돗물을 공급하기 위해 각종 오염원이 상수원에 유입되지 못하도록 수질오염 문제에 대한 규제를 강화하기에 이르렀다.

물에 의해 하천으로 유입되는 다양한 유해물질들은 수중 생태계 및 하상에 퇴적되는 퇴적물을 오염시키고 수중 환경을 비롯한 전 지구적인 환경변화를 가져온다. 이러한 유해물질들을 대상으로 한 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 진행된 바 있으나(김, 1997; 이 등, 2001a; 전 등,

[†] To whom correspondence should be addressed.
yeongsanriver@hanmail.net

1998), 강과 하천의 하상퇴적물을 대상으로 한 연구는 최근에서야 이루어지고 있다(문 등, 2000; 이 등, 2002; 오 등, 2003a, 2003b; 윤 등, 2004).

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, 물 이용부담금 부과 등의 정책적인 연구가 활발히 진행되고 있다. 영산강권역에 대한 선행연구로는 광주·전남의 수자원 확보, 수질보존, 관리 및 개선 등에 관한 연구(광주광역시, 1996; 전라남도, 1996; 정부합동, 2000) 등의 정책연구와 수질환경에 관한 이화학적 연구(차 등, 1999; 황, 2001; 윤 등, 2003) 등이 이루어진 바 있다. 그러나 하상퇴적물 중에 함유된 금속성분들의 지구화학적 특성 및 오염에 관한 연구들은 상대적으로 저조한 실정이다(오 등, 2003a, 2003b; 윤 등, 2004; 조 등, 1998). 이 연구는 영산강 상류권역에 위치한 영산강 본류 및 황룡강, 광주천, 지석천에서 채취된 하상퇴적물을 대상으로 지구화학적 특성과 거동을 규명하는 한편, 유해 중금속들의 실태와 그 원인에 대하여 해석을 시도하였으며, 영산강권역의 수질보존 및 관리를 위한 기초 자료로 활용하는데 그 목적이 있다.

2. 연구지역 개요

2.1. 영산강 수계 현황

우리나라 서남단에 위치하는 영산강은 전형적인 곡류천으로 노령산맥을 중심으로 남남서 방향의 수지상 하계망을 이루고 있다. 영산강은 유역면적 3,371 km², 하천연장 1,472 km, 본류의 유로연장 136 km로서 우리나라 4대강 중의 하나로 황룡강, 광주천, 지석천, 고막원천, 함평천 등 5개의 제1차 지류들을 포괄한다. 영산강권역은 중류의 나주시 영산포 일대를 기준으로 황룡강, 지석천, 광주천을 포함하는 상류권역과 고막원천, 함평천을 포함하는 하류권역으로 크게 나누어진다(정부합동, 2000). 영산강 상류권역에 해당하는 황룡강은 유로 연장 61.9 km, 유역면적 547.34 km²로 장성군 북하면 신성리에서 발원하여 장성댐과 장성군 대부분을 관류하며, 광주시 광산구 송정 부근에서 영산강 본류에 합류한다(Fig. 1). 광주천은 유로 연장 24.2 km, 유역면적 104.97 km²로 광주광역시 동구 지원동 용연마을과 화순 경계인 장불재 서쪽에서 발원하여 광주광역시 중심부를 관류하며 서쪽으로 진행하다가 광주광역시 치평동과 유덕동의 경계를 이루며 남서방향으로 흘러 영산강과 합류한다. 지석천은 유로연장 53.0 km, 유역면적 619.59 km²로 화순군 이양면 중리 계당산 남쪽 천리나골에서 발원하여 능주와 남평 지역을 흘러 서쪽인 광주광역시 광산구 본덕동 원곡마을에서 영산강과 합류한다(수자원공사, 1992).

2.2. 영산강 수계 지질

영산강 유역의 지질은 선캄브리아기의 편마암류, 고생대

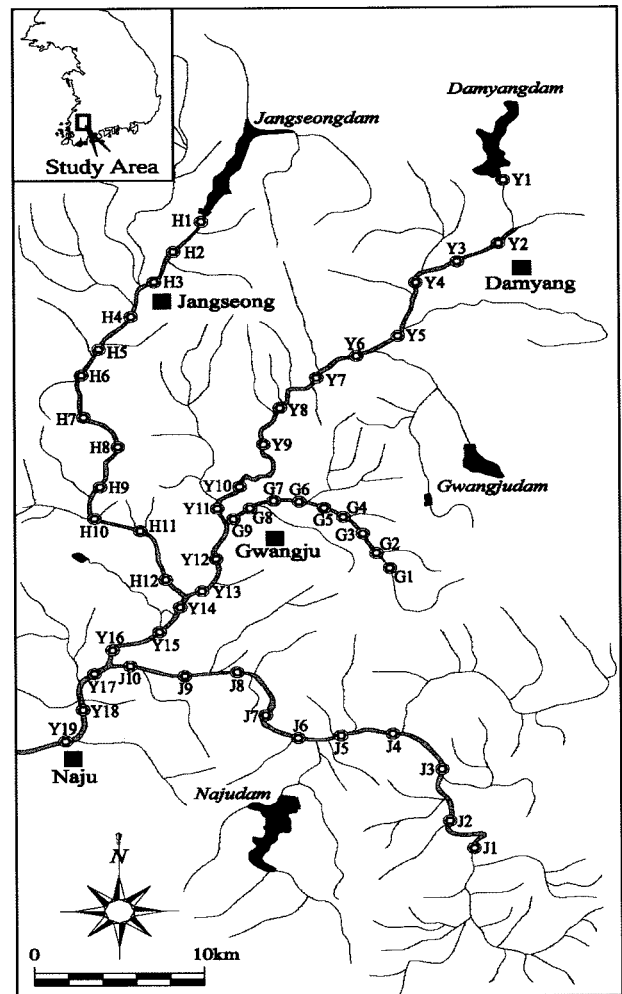


Fig. 1. Map showing the study area and sampling sites(Y: Yeongsanriver main stream, H: Hwangryong river, G: Gwangju stream, J: Jiseok stream).

퇴적암류, 중생대 편마상화강암류, 퇴적암류, 화산암류, 심성-반심성암류, 화강암류, 신생대 제4기 층적층 등으로 이루어져 있다(Fig. 2). 선캄브리아기 편마암류는 유역에서 가장 오래된 지층으로 황룡강 중상류, 지석천 상류 부근에 넓게 분포하며, 고생대 퇴적암류는 규암, 운모편암, 결정질 석회암 등으로 구성되어 있으며, 남동부 화순탄전 지대에 분포한다.

중생대 화강암류는 영산강 상류의 담양읍, 용면, 무정면 일대에 분포한다. 퇴적암류는 신라층군 하부층과 능주층군으로 구성되어 있는데, 역암, 사암, 세일로 구성된 신라층군 하부층은 화순탄전 부근, 장성댐 북서부 등지에 분포하고 역암, 응회암, 유문암으로 구성된 능주층군은 지석천과 황룡강 중상류에 분포한다.

화산암류 중에서 안산암은 무등산 부근에 분포하고 유문암은 고막원천과 함평천 중상류, 지석천 중상류에 분포하여 높은 산지나 구릉을 형성하고 있으며, 반려암, 섬록암, 석영반암으로 구성된 심성 및 반심성암류는 병풍산 주변에 분포한다. 중생대 화강암류는 유역에서 가장 넓게 분포하는 암층으로 광주화강암 또는 흑운모화강암이라고도 불리며,

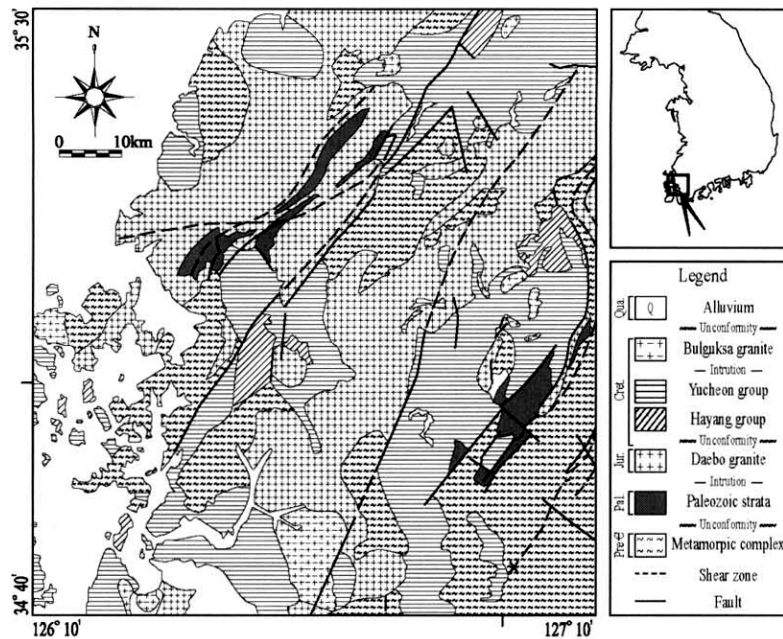


Fig. 2. Geological map of the study area(modified after; Ministry of Science & Technology, 1997).

영산강 중류 일대에서 폭 15 - 20 km 내의 연장 40 km의 큰 저반상의 관입화강암으로 나타나며, 영산강 중류와 황룡강 연안을 따라 100 m 내외의 높이로 구릉지를 형성한다. 화강암류는 북북동-남남서 분포방향으로 볼 때 영산강 중류 부근 하계 방향과 지형형성에 가장 큰 영향을 미친 암체로 보인다. 한편, 충적층은 분류와 주요 지류를 따라서 협소하게 분포하고 있으며, 앞선 시기의 지층을 부정합으로 덮고 있다(과학기술부, 1997).

3. 재료 및 방법

이 연구는 영산강 상류수계를 대상으로 전라남도 하천도(1:250,000)와 지형도(1:50,000)를 참고하여, 영산강 본류 19개, 황룡강 12개, 광주천 9개, 지석천 10개 지점에서 총 50개 하상퇴적물을 채취하였다. 하상퇴적물의 채취점정은 유로를 따라 약 3~4 km 간격으로 채취하였으며, 인구밀집 지역인 광주천과 지류가 합류하는 본류의 상·하부에서는 1~2 km 내외에서 채취하였다. 시료채취 방법은 금속기기에 의한 오염을 방지하기 위해, 도보로 가능한 지역에서는 플라스틱 삽을 이용하여 표층 3 cm 이내의 퇴적물을 채취한 후, 약 1 m 간격의 정방향으로 채취한 9개 부분시료를 합하여 하나의 완전시료로 사용하였다. 또한, 수심이 깊은 지역은 소형 모터보트를 이용하여 라폰 형(La-Pond type) 채니기로 유로를 따라 채취한 후, 채니기 중심 부분의 시료만을 분석용 시료로 사용하였다.

퇴적물의 입도분석은 20~30 g 정도의 시료를 취하여 유기물과 탄산염을 제거한 후, Ingram(1971)과 Galehouse(1971)의 방법에 따라 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.

지구화학적 분석은 표층퇴적물 시료를 70 °C 이하로 건조기에서 충분히 건조시킨 후, 200 mesh 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 유도결합플라즈마방출분광기(ICP-AES)를 이용하여 분석하였다. 원소의 분석시, 자료의 신뢰도를 검증하기 위해 미국표준기술연구소(NIST)의 하상퇴적물 표준시료(RM 8704; buffalo river sediment)와 동일시료에 대한 중복분석을 실시하였으며, 그 결과 정확도(표준시료에 대한 상대오차)는 표준시료의 오차 이내로 정밀도와 함께 $\pm 10\%$ 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 황산암모늄제 II 철($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$)로 정량하는 역적정(back titration)으로 분석하였다(Strickland et al., 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 따라 유기탄소 함량을 보정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 금속 원소와 유기탄소 함량 및 입도

영산강 상류수계의 50개 하상퇴적물을 대상으로 분석한 금속 원소들의 함량 분포는 Table 1과 같다. 제시된 금속원소 값의 평균은 세계적 지각평균함량(Mason et al., 1982)

Table 1. Geochemical elements, mean grain size and organic carbon contents of surface sediments in the study area

	Al ¹	Fe ¹	Mg ¹	Ca ¹	Na ¹	K ¹	Ti ¹	P ¹	Mn ¹	Ba ²	Co ²	Cr ²	Cu ²	Li ²	Ni ²	Sr ²	Zn ²	Zr ²	Pb ²	Cd ²	C-org ¹	Mz ³
<i>Yeongsan main stream sediments (n=19)</i>																						
Min.	3.70	0.66	0.10	0.26	0.52	2.32	0.08	0.01	0.01	629	0	2	1	9	2	122	17	87	14	<1	0.03	-2.08
Max.	8.88	3.79	0.68	1.37	1.19	3.30	0.38	0.10	0.09	909	9	29	19	43	15	203	150	385	33	<1	2.96	5.15
Aver.	5.35	1.54	0.27	0.68	0.83	2.74	0.24	0.03	0.04	756	2	9	5	20	6	160	49	260	19	<1	0.51	0.61
SD	1.44	0.80	0.17	0.27	0.21	0.26	0.10	0.03	0.02	82	2	7	5	10	3	25	35	81	5		0.77	1.81
<i>Hwangryong river sediments (n=12)</i>																						
Min.	3.49	0.69	0.13	0.20	0.50	2.08	0.07	0.01	0.01	487	0	3	0	13	3	99	17	151	11	<1	0.02	-3.47
Max.	9.07	4.22	1.03	1.00	1.70	3.15	0.35	0.08	0.07	859	9	39	13	48	20	235	79	521	25	<1	0.52	1.67
Aver.	5.18	1.67	0.37	0.39	0.82	2.73	0.18	0.03	0.03	638	3	14	4	24	8	145	38	311	15	<1	0.17	-1.05
SD	1.57	1.12	0.27	0.22	0.32	0.35	0.09	0.02	0.02	104	3	11	4	10	5	37	20	87	4		0.14	1.52
<i>Gwangju stream sediments (n=9)</i>																						
Min.	4.91	1.43	0.31	0.79	0.57	1.48	0.14	0.04	0.02	655	2	13	9	15	8	172	68	64	15	<1	0.29	-0.53
Max.	9.61	4.88	1.39	1.74	1.42	2.52	0.50	0.72	0.15	922	16	73	290	59	67	289	951	286	81	3	17.30	6.60
Aver.	6.97	3.13	0.81	1.37	0.96	2.13	0.31	0.22	0.07	761	8	40	84	37	23	225	289	176	42		3.83	2.46
SD	1.75	1.41	0.44	0.37	0.26	0.34	0.15	0.25	0.05	81	6	24	108	17	19	38	338	83	25		5.77	2.82
<i>Jiseok stream sediments (n=10)</i>																						
Min.	4.08	1.20	0.22	0.10	0.36	1.54	0.11	0.02	0.02	540	2	12	3	25	7	91	31	102	11	<1	0.26	-0.93
Max.	7.35	3.15	0.66	1.01	1.07	2.64	0.31	0.28	0.26	780	15	35	24	54	32	218	191	247	26	<1	7.71	7.18
Aver.	5.90	2.29	0.45	0.48	0.69	2.19	0.23	0.08	0.08	663	7	25	9	40	15	134	72	181	19	<1	1.46	1.70
SD	0.93	0.61	0.13	0.28	0.20	0.35	0.06	0.08	0.07	62	4	8	6	10	7	39	48	49	5		2.31	2.59
<i>Mean crust value(modified after, Mason and Moore, 1982)</i>																						
MCV	8.13	5.00	2.09	3.63	2.83	2.59	0.44	0.11	0.10	425	25	100	55	20	75	375	70	165	13	0.2	-	-

(unit : ¹%, ²mg/kg, ³Ø, C-org : organic carbon, Mz: mean grain size, MCV: mean crust value)

과 비교할 때, 미량성분 원소인 Ba, Li, Zr, Pb 등이 비교적 높은 함량을 보였으며, 주성분 원소를 비롯한 대다수의 금속원소들이 낮은 함량을 보였으나 환경에 따른 함량 변화가 크게 나타났다. 시료간 금속원소의 함량변화(σ/\bar{x})가 100% 이상 보인 원소로는 영산강 본류와 황룡강에서 Co, Cu, 광주천에서 P, Cu, Zn, 지석천에서 P 등으로 나타났다.

한편, 유기탄소의 함량은 영산강 본류에서 0.03~2.96% (0.51%), 황룡강 0.02~0.52% (0.17%), 광주천 0.29~17.28% (3.83%), 지석천 0.26~7.71% (1.46%)로 황룡강을 제외한 곳에서 100% 이상의 함량변화를 보였다. 입도는 영산강 본류에서 -2.08~5.15 Ø (평균 0.61 Ø), 황룡강 -3.47~1.67 Ø (-1.05 Ø), 광주천 -0.53~6.60 Ø (2.46 Ø), 지석천 -0.93~7.18 Ø (1.70 Ø)로 잔자갈(pebble)에서 세립실트(fine silt)까지 다양하게 분포하였다(Friedman et al., 1978).

4.2. 금속원소 함량변화의 조절 요인

하상퇴적물 내의 금속원소의 함량변화는 퇴적물의 지각 근원물질, 입도, 유기물, 산화물 등의 영향에 민감한 것으로 알려져 있다(Förstner et al., 1981; Salomons et al, 1984; Adriano, 1986). 연구지역에서 금속원소들의 함량변화를 보면, Al, Fe, P, Mn, Co, Cr, Cu, Li, Ni, Zn, Pb 등의 금속원소들이 퇴적물의 평균 입도와 r=0.5 이상의 상관계수 및 유의계수 p<0.01을 보이며, 입도의 세립화에 따라 증가하는 경향을 보였다(Table 2). 이들 금속원소들은 주로 입도 및 점토광물 원소들과 밀접한 관련성을 보여, 입도의

세립화에 따른 알루미늄-규산염 광물의 영향이 일부 작용하고 있음을 시사하였다(오 등, 2003b; Krauskopf, 1982). 또한, 유기물질의 영향을 살펴보기 위한 유기탄소와 금속원소와의 상관관계는 P, Cr, Cu, Ni, Zn, Pb가 r=0.7 이상의 비교적 높은 상관계수를 보이며, 유기탄소의 함량 변화에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 일반적으로 P는 인회석 등에 일부 지각에 함유되는 물질로 알려져 있으나, 대표적인 생활하수 등에 의한 오염물질로 유기물에 다량 함유되며, Cu, Zn, Pb 등의 중금속원소들과 함께 유기물에 흡착되는 특성을 보인다(Irving et al., 1948; 오 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 이용한 요인분석(Factor analysis)을 실시하였으며, 결과의 해석을 용이하게 하기 위하여 Kaiser 정규화가 된 베리맥스법(varimax)으로 요인행렬을 회전시킨 후 요인을 구하였다. 분석결과 총 3개의 요인이 자료의 총분산에 대하여 82.23%의 설명력을 갖는 것으로 나타났다(Table 3). 요인 1은 전체 자료 분산에 대한 기여율이 33.03%로 P, Cu, Ni, Zn, Pb, 유기탄소 등이 높은 적재량을 보였다. 이들 변수들은 유기물과 친화력이 비교적 높은 원소들로(Aston, 1974; Wittmann, 1983), 수증환경에서 유기물의 증가가 이들 원소들의 함량변화에 작용한 결과로 판단된다. 요인 2는 전체분산에 대한 기여율이

Table 2. Correlation matrix of elements, mean grain size and organic carbon contents in surface sediments

	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	Ti	P	Mn	Ba	Co	Cr	Cu	Li	Ni	Sr	Zn	Zr	Pb	C-org	Mz	
Al	1.00																					
Fe	0.93	1.00																				
Mg	0.87	0.96	1.00																			
Ca	0.64	0.71	0.72	1.00																		
Na	0.51	0.43	0.45	0.45	1.00																	
K	-0.19	-0.42	-0.42	-0.39	0.27	1.00																
Ti	0.70	0.77	0.71	0.70	0.33	-0.23	1.00															
P	0.41	0.52	0.54	0.55	-0.11	-0.62	0.38	1.00														
Mn	0.59	0.67	0.63	0.42	0.01	-0.51	0.55	0.51	1.00													
Ba	0.40	0.26	0.28	0.46	0.51	0.23	0.34	0.16	0.16	1.00												
Co	0.83	0.94	0.91	0.63	0.23	-0.56	0.75	0.56	0.83	0.16	1.00											
Cr	0.68	0.80	0.85	0.63	0.13	-0.60	0.57	0.80	0.56	0.16	0.80	1.00										
Cu	0.37	0.46	0.51	0.54	-0.08	-0.53	0.38	0.95	0.38	0.22	0.46	0.76	1.00									
Li	0.83	0.88	0.84	0.42	0.22	-0.45	0.58	0.44	0.74	0.13	0.89	0.74	0.37	1.00								
Ni	0.55	0.67	0.70	0.52	-0.02	-0.62	0.47	0.87	0.68	0.22	0.73	0.89	0.86	0.67	1.00							
Sr	0.59	0.62	0.64	0.87	0.69	-0.16	0.55	0.27	0.23	0.58	0.47	0.43	0.31	0.33	0.32	1.00						
Zn	0.43	0.51	0.53	0.55	-0.07	-0.55	0.39	0.97	0.44	0.25	0.51	0.77	0.99	0.42	0.89	0.32	1.00					
Zr	-0.68	-0.68	-0.61	-0.49	-0.20	0.45	-0.48	-0.55	-0.62	-0.32	-0.67	-0.59	-0.47	-0.67	-0.58	-0.34	-0.52	1.00				
Pb	0.53	0.57	0.60	0.66	-0.03	-0.49	0.50	0.91	0.45	0.29	0.56	0.81	0.93	0.45	0.83	0.39	0.94	-0.54	1.00			
C-org	0.33	0.42	0.42	0.45	-0.22	-0.59	0.31	0.96	0.47	0.08	0.48	0.70	0.86	0.36	0.76	0.12	0.88	-0.51	0.84	1.00		
Mz	0.59	0.57	0.49	0.44	-0.17	-0.50	0.41	0.69	0.65	0.15	0.65	0.61	0.59	0.58	0.67	0.17	0.65	-0.63	0.71	0.70	1.00	

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

Table 3. Factor analysis of variables and factor scores for surface sediments in the study area

	factor 1	factor 2	factor 3
Al	0.17	0.79	0.48
Fe	0.26	0.86	0.39
Mg	0.30	0.80	0.43
Ca	0.43	0.40	0.68
Na	-0.29	0.21	0.82
K	-0.57	-0.45	0.28
Ti	0.20	0.63	0.46
P	0.94	0.27	0.08
Mn	0.31	0.79	-0.05
Ba	0.13	-0.01	0.77
Co	0.31	0.92	0.18
Cr	0.65	0.61	0.20
Cu	0.95	0.16	0.17
Li	0.19	0.92	0.08
Ni	0.78	0.51	0.09
Sr	0.14	0.29	0.85
Zn	0.94	0.21	0.17
Zr	-0.38	-0.63	-0.18
Pb	0.89	0.27	0.25
C-org	0.91	0.22	-0.05
Mz	0.61	0.53	-0.06
Eigenvalue	6.94	6.78	3.55
% of variation	33.03	32.30	16.90
Cummulative	33.03	65.33	82.23

32.30%로 Al, Fe, Mg, Ti, Mn, Co, Cr, Li, 등이 높은 적재량을 보였다. 이들 변수들은 쇄설성 점토광물 기원의 원

소들과 관련이 있는 것으로 보고되어져 있다(이 등, 1998). 즉, 연구지역의 주변 암석에서 풍화되어 공급되어진 입도에 따른 세립질의 점토광물의 영향을 반영하는 것으로 보여진다. 요인 3은 16.90%의 기여율로 Ca, Na, Ba, Sr 등이 높은 적재량을 보이는데 Ba는 퇴적물 내의 장석류 입자의 산출과 연관성이 있으며, Ca 및 Sr은 탄산염광물과 관련지어 생각해 볼 때(Bowen, 1979), 하상퇴적물의 근원지인 주변 육상 지질과 관련되어 있을 것으로 추정된다.

이와 같이, 퇴적물 내의 금속원소 함량변화는 대부분 여러 요인들이 복합적으로 작용함으로써 다양한 함량변화를 가져온다. 즉 연구지역에서 금속원소들의 함량 변화는 생활하수 등에 의한 유기물의 영향, 입도 및 점토광물의 조성 분 원소들과 밀접한 관련성을 보이며, 주변 지질의 영향 역시 작용하고 있음을 시사하였다.

4.3. 금속원소의 오염

퇴적물 내의 금속원소의 오염 또는 인위적인 영향 등을 파악하기 위해서, Bruland 등(1974)에 의한 부화지수(Enrichment Factor: EF)와 Müller(1979)에 의한 농축지수(index of geoaccumulation: Igeo)를 구하였다. 일반적으로 부화지수는 퇴적물 내 점토광물의 구성비율과 미량원소의 상대적인 함량변화를 이용하여 지각평균함량의 절대값을 기준으로 한 금속원소 농축평가에 사용된다(조 등, 1998; 오 등, 2003b). 이와 달리 농축지수는 호수, 강, 해양퇴적물의 중금속함량을 오염되지 않은 지역의 중금속 함량과 비교하여 정량하는 방법으로, 연구지역의 상대적 퇴적물 오염 정도를 평가하는 데 사용된다(이 등, 1997; 이 등, 2001b; 윤 등, 2004). 본 연구에서 부화지수의 보존성원소로는 그

기원이 대부분 지각물질로 알려져 있고, 연구지역에서 상대적으로 함량 변화와 편차가 작게 나타난 Al을 사용하였으며, 지각 평균값은 Mason 등(1982)에 의해 제시된 클라크 농도(clark of concentration)를 사용하였다. 농축지수의 바탕값(background value)으로는 연구지역에서 분석된 하상퇴적물의 금속원소별 최소값을 사용하였다. 한편, 이들 지수 값은 부화지수의 경우 1 이상의 값을 보일 때 오염이 진행되는 것을 의미하며, 농축지수는 지수값에 따라 오염의 정도를 달리 표기하고 있다(Table 4).

Table 4. Classment of index of geoaccumulation

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

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

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

영산강 본류에서의 부화지수는 K 0.91~2.28(평균 1.70), Ba 1.66~3.78(2.84), Li 0.82~2.18(1.44), Zr 0.48~4.70(2.67), Pb 1.63~2.91(2.29), 황룡강에서는 K 1.07~2.25(1.73), Ba 1.42~3.00(2.45), Li 1.51~2.28(1.87), Zr 0.82~5.04(3.23), Pb 0.97~2.65(1.92), 지석천에서는 K 0.75~1.55(1.19), Mn 0.33~3.46(1.08), Li 2.20~3.22(2.75), Zn 0.78~3.44(1.37), Zr 0.78~2.68(1.59), Pb 1.40~2.79(2.00)의 값을 보였다(Table 5). 반면, 광주천에서는 P 0.69~8.30(2.40), Cu 0.27~5.55(1.68), Zn 1.28~14.29(4.64), Pb

1.53~7.45(3.70) 등의 값을 보여 유해 중금속으로 분류되는 원소들의 오염이 상당히 진행된 것으로 나타났다.

한편, 연구지역 금속원소의 상대적 농축정도를 파악하기 위한 농축지수는 Table 6과 같이 나타났다. 이들 농축지수 중 유해 금속원소로 분류되는 P, Cu, Zn, Pb 등의 농축지수를 살펴보면, 본류에서 P 최대값 2.74(평균 0.70), Cu 3.66(1.04), Zn 2.56(0.65), Pb 0.65(-0.16), 황룡강에서 P 2.42(0.85), Zn 1.63(0.42), Pb 0.60(-0.16), 지석천에서 P 3.22(0.83), Cu 2.42(0.77), Zn 2.04(0.42), Pb 0.66(0.15)의 값을 보여 평균적인 농축이 모두 ‘비오염(practically unpolluted)’에 해당하는 것으로 나타났다. 그러나 광주천에서는 P 3.58(1.18), Cu 4.43(1.55), Zn 3.22(0.76), Pb 1.85(0.66)으로 일부 정점에서는 ‘보통 내지 강한 오염(moderately/strongly polluted)’과 ‘강한 오염(strongly polluted)’ 등으로 농축이 상당히 진행된 것으로 나타났다.

연구지역 하상퇴적물을 대상으로 금속원소의 오염과 관련되어 산정한 부화지수와 농축지수를 종합한 결과, 본류, 황룡강, 지석천 퇴적물에서는 특별히 금속원소가 농축되지는 않으나, 광주천에서는 P, Cu, Zn, Pb 등에 의한 금속원소 농축이 진행된 것으로 보인다. 영산강 상류수계의 지류인 광주천에서 이들 금속원소들이 특정 지점에서 부화지수 > 5의 값과 농축지수 > 2의 값을 보여주는 것은 영산강 수계에 인구밀집지역인 광주광역시를 관류하는 하천에 영향을 크게 작용하고 있음을 시사한다. 특히, 주성분원소인 P와 Cu, Zn, Pb 등의 미량원소의 농축은 환경유해원소로 하천 바닥에 장기간 체류할 경우, 하천의 기능을 저하시켜 수중생물의 생태와 환경을 파괴하는 유해 요인으로 작용할 수 있기에 (Aston et al., 1974; Wittmann, 1983; Horowitz, 1991) 영산강 수계의 보전을 위한 적절한 하상퇴적물의 관리가 시급한 것으로 판단된다.

5. 결론

- 1) 영산강 상류수계를 이루는 영산강 본류, 황룡강, 광주천, 지석천에서 채취된 하상퇴적물의 금속원소 평균은 세계

Table 5. Enrichment factors(EF) for metals in the study area

		Fe	Mg	Ca	Na	K	Ti	P	Mn	Ba	Co	Cr	Cu	Li	Ni	Sr	Zn	Zr	Pb
YSS ¹	Min.	0.28	0.10	0.15	0.30	0.91	0.38	0.13	0.23	1.66	0.00	0.04	0.03	0.82	0.05	0.48	0.50	0.48	1.63
	Max.	0.77	0.32	0.56	0.57	2.28	1.77	0.97	0.96	3.78	0.36	0.29	0.35	2.18	0.20	0.85	1.96	4.70	2.91
	Aver.	0.45	0.18	0.28	0.45	1.70	0.85	0.43	0.58	2.84	0.12	0.13	0.12	1.44	0.11	0.67	0.97	2.67	2.29
HRS ²	Min.	0.32	0.14	0.09	0.27	1.07	0.37	0.22	0.25	1.42	0.00	0.07	0.00	1.51	0.06	0.38	0.57	0.82	0.97
	Max.	0.82	0.55	0.31	0.67	2.25	0.88	0.85	0.66	3.00	0.40	0.43	0.26	2.28	0.30	0.85	1.21	5.04	2.65
	Aver.	0.49	0.26	0.17	0.46	1.73	0.61	0.44	0.47	2.45	0.14	0.22	0.09	1.87	0.16	0.62	0.81	3.23	1.92
GJS ³	Min.	0.47	0.25	0.36	0.24	0.69	0.50	0.63	0.35	1.43	0.13	0.21	0.27	1.24	0.17	0.52	1.28	0.47	1.53
	Max.	0.97	0.67	0.57	0.67	1.61	1.02	8.30	1.66	2.98	0.54	0.88	5.55	2.79	0.94	1.00	14.29	2.87	7.45
	Aver.	0.70	0.42	0.44	0.41	1.03	0.77	2.40	0.84	2.20	0.35	0.45	1.68	2.09	0.35	0.73	4.64	1.41	3.70
JSS ⁴	Min.	0.48	0.21	0.04	0.16	0.75	0.46	0.30	0.33	1.69	0.16	0.24	0.11	2.20	0.19	0.37	0.78	0.78	1.40
	Max.	0.77	0.40	0.36	0.49	1.55	0.94	3.37	3.46	2.53	0.76	0.45	0.55	3.22	0.54	0.75	3.44	2.68	2.79
	Aver.	0.62	0.29	0.18	0.34	1.19	0.71	0.93	1.08	2.18	0.34	0.34	0.22	2.75	0.27	0.49	1.37	1.59	2.00

(¹Yeongsan main stream sediments, ²Hwangryong river sediments, ³Gwangju stream sediments, ⁴Jiseok stream sediments)

Table 6. Indices of geoaccumulation(Igeo) for metals in the study area

		Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	Ti	P	Mn	Ba	Co	Cr	Cu	Li	Ni	Sr	Zn	Zr	Pb
YSS	Min.	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58
	Max.	0.68	1.94	2.18	1.81	0.61	-0.08	1.66	2.74	2.58	-0.05	-	3.27	3.66	1.67	2.32	0.15	2.56	1.56	0.65
	Aver.	-0.10	0.48	0.56	0.68	0.04	-0.35	0.84	0.70	1.12	-0.33	-	1.23	1.04	0.39	0.71	-0.21	0.65	0.91	-0.16
HRS	Min.	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-	-0.58	-	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58
	Max.	0.79	2.03	2.40	1.74	1.18	0.01	1.74	2.42	2.22	0.23	-	3.12	-	1.30	2.15	0.66	1.63	1.20	0.60
	Aver.	-0.07	0.46	0.66	0.23	0.05	-0.21	0.63	0.85	0.79	-0.21	-	1.27	-	0.22	0.51	-0.07	0.42	0.41	-0.15
GJS	Min.	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58
	Max.	0.38	1.19	1.58	0.55	0.73	0.18	1.25	3.58	2.32	-0.09	2.42	1.90	4.43	1.39	2.48	0.16	3.22	1.57	1.85
	Aver.	-0.12	0.39	0.56	0.15	0.11	-0.08	0.38	1.18	0.97	-0.38	1.06	0.77	1.55	0.58	0.60	-0.21	0.76	0.71	0.66
JSS	Min.	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58
	Max.	0.26	0.81	1.00	2.75	0.99	0.19	0.91	3.22	3.12	-0.05	2.32	0.96	2.42	0.53	1.61	0.68	2.04	0.69	0.66
	Aver.	-0.07	0.30	0.40	1.41	0.28	-0.09	0.41	0.83	0.94	-0.29	0.89	0.40	0.77	0.06	0.39	-0.08	0.42	0.19	0.15

적 지각평균함량과 비교할 때, Ba, Li, Zr, Pb 등은 높은 함량을 보였으며, 주성분 원소를 비롯한 대다수의 금속원소들이 낮은 함량을 보였다.

- 2) 시료간 금속원소의 함량변화는 영산강 본류에서 Co, Cu, P, Cr, Zn, 황룡강 Co, Cu, Mg, Cr, 광주천 P, Cu, Zn, Ni, 지석천 P, Mn, Cu 등이 비교적 큰 함량변화를 나타냈다.
- 3) 연구지역 하상퇴적물 내의 금속원소 함량변화는 생활하수 등에 의한 유기물의 영향, 입도 및 점토광물의 주성분 원소들과 밀접한 관련성을 보이며, 주변 지질의 영향이 복합적으로 작용하고 있음을 시사하였다.
- 4) 금속원소의 오염을 파악하기 위한 부화지수와 농축지수를 산출한 결과, 영산강 본류, 황룡강, 지석천의 하상퇴적물 내의 금속원소 함량은 유의할 만한 수준의 오염이 진행되지는 않은 상태임을 시사하였다. 그러나, 광주천에서 P, Cu, Zn, Pb 등의 부화지수와 농축지수가 특정 지점에서 높게 나타나는 것을 볼 때, 영산강 수계에 광주광역시를 관류하는 하천에 영향을 크게 작용하고 있음을 시사하고 있으며, 영산강 수계의 보전을 위한 도시하천의 관리가 시급한 것으로 판단된다.

참고문헌

과학기술부, 광주 지질도폭 설명서(1:250,000) (1997).
 광주광역시, 영산강 수질관리 종합대책 수립에 관한 연구 (1996).
 김경용, 달성광산지역 토양의 중금속함량 분석결과와 평가, *지하수환경*, 4, pp. 20-26 (1997).
 문지원, 이상훈, 문희수, 안양천 바다 퇴적물의 지구화학적 특성에 따른 하천수 오염영향, *자원환경지질*, 33, pp. 205-215 (2000).
 수자원공사, 전국하천조사서 (1992).
 오강호, 고영구, 윤석태, 화순지역 토양-퇴적물-하천수의 지구화학적 특성, *환경영향평가*, 12, pp. 9-22 (2003a).
 오강호, 김주용, 고영구, 윤석태, 신상은, 박배영, 문병찬, 김해경, 광주광역시 하천의 표층퇴적물에 대한 지구화학적 특성과 오염, *한국지구과학회지*, 24, pp. 346-360 (2003b).
 윤석태, 고영구, 오강호, 문병찬, 김해경, 영산강 하류권역

하천수의 수질평가, *환경영향평가*, 12, pp. 259-270 (2003).
 윤석태, 고영구, 오강호, 문병찬, 김해경, 영산강 하류권역 하상퇴적물의 지화학적 특성과 오염평가, *환경영향평가*, 13, pp. 251-262 (2004).
 이성은, 김규한, 이진수, 전효백, 탄천의 하상퇴적물과 하천수내 주요 용존 이온과 중금속의 수리지구화학적 특성과 오염, *자원환경지질*, 35, pp. 25-41 (2002).
 이종현, 이정석, 김범수, 이창복, 고철환, 경기만 퇴적물의 중금속 분포 특성, *바다*, 3, pp. 103-111 (1998).
 이찬희, 이현구, 윤경무, 토현광산 수계에 분포하는 토양과 퇴적물의 지구화학적 특성, 이차적오염 및 중금속의 거동, *자원환경지질*, 34, pp. 39-53 (2001a).
 이평구, 박성원, 염승준, 공주 금흥매립지의 중간복토재 및 차수재(논토양)의 중금속 오염과 존재형태 연구, *자원환경지질*, 34, pp. 283-299 (2001b).
 이평구, 이재영, 프랑스 A-71 고속도로변 Retention pond의 기능평가, *한국토양환경학회지*, 2, pp. 73-81 (1997).
 전라남도, 영산강 수질개선 종합대책 수립에 관한 연구 (1996).
 전효백, 김주용, 최시영, 폐 석탄광 주변 지구화학적 환경의 중금속 오염 평가-강릉탄전 입곡천 일대를 중심으로-, *자원환경지질*, 31, pp. 499-508 (1998).
 정부합동, 호남의 생명수 지키기 대역사 -영산강수계 물관리 종합대책- (2000).
 조영길, 김주용, 영산강 하상퇴적물의 중금속 함량, *한국환경과학회지*, 7, pp. 281-290 (1998).
 차진명, 신성의, 차규석, 영산강 수계의 비점오염원에 관한 연구 I -토지이용 및 강우를 중심으로-, *환경영향평가*, 8, pp. 41-49 (1999).
 환경부, 세계 물의 해 자료집 (2003).
 황대호, 영산강 수질기준 달성을 위한 BOD 부하량 삭감방법의 비교 연구, 서울대학교 석사학위논문 (2001).
 Adriano, D. C., *Trace Elements in the Terrestrial Environment*, Springer-Verlag, Berlin (1986).
 Alloway, B. J., Thornton, I., Smart, G. A., Sherlock, J. C. and Quinn, M. J., Metal Availability, *Science of The Total Environment*, 75, pp. 41-69 (1988).
 Aston, S. R., Thornton, I., Webb, J. S., Purves, J. B. and Milford, B. L., Stream Sediment Composition, an Aid to Water Quality Assessment, *Water Air and Soil Pollution*, 3, pp. 321-325 (1974).
 Bowen, H. J. M., *Environmental Chemistry of the Elements*,

- Academic Press, London (1979).
- Bruland, K. W., Bertine, K., Koide, M. and Goldberg, E. D., History of Metal Pollution in Southern California Coastal Zone, *Environmental Science and Technology*, **8**, pp. 425-432 (1974).
- Förstner, U. and Wittmann, G. T. W., *Metal Pollution in the Aquatic Environment*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1981).
- Friedman, G. M. and Sanders, J. E., *Principles of Sedimentology*, Wiley-Interscience, New York (1978).
- Galehouse, J. S., *Sedimentation Analysis*, In Carver, R. E.(ed.), *Procedures in Sedimentary Petrology*, Wiley-Interscience, New York, pp. 69-94 (1971).
- Horowitz, A. J., *A Primer on Sediment-Trace Element Chemistry*, Lewis Publishers, Chelsea (1991).
- Ingram, R. L., *Sieve Analysis*, In Carver, R. E.(ed.), *Procedures in Sedimentary Petrology*, Wiley-Interscience, New York, pp. 49-68 (1971).
- Irving, H. and Williams, R., Order of Stability of Metal Complexes, *Nature*, **162**, pp. 746-747 (1948).
- Krauskopf, K. B., *Introduction to Geochemistry*, McGraw-Hill, New York (1982).
- Mason, B. and Moore, C. B., *Principles of Geochemistry*, John Wiley & Sons Inc, New York (1982).
- Müller, G., Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins-Verderungen Seit, *Umschau*, **79**, pp. 778-783 (1979).
- Salomons, W. and Förstner, U., *Metals in the Hydrocycle*, Springer-Verlag, Berlin (1984).
- Strickland, J. D. H. and Parsons, T. R., *A Practical Handbook of Seawater Analysis*, Fishery Research Board of Canada, Ottawa (1972).
- Thornton, I., *Applied Environmental Geochemistry*, Academic Press, London (1983).
- Wittmann, G. T. W., *Metal Pollution in the Aquatic Environment*, Springer-Verlag, Berlin (1983).