

화순지역 토양-퇴적물-하천수의 지구화학적 특성

오강호 · 고영구 · 윤석태

전남대학교 과학교육학부

(2003년 1월 7일 접수, 2003년 3월 3일 승인)

Geochemical Characteristics of Soils, Sediments and Waters in stream of Hwasun area

Kang-Ho Oh · Yeong-Koo Koh · Seok-Tai Youn

Department of Science Education, Chonnam National University

(Manuscript received 7 January 2003; accepted 3 March 2003)

Abstract

To consider environmental characteristics in the scope of geochemistry of streams, Hwasun area, soil, sediment and water samples near/in the streams were analyzed in texture and metal contents of soil and sediment and in quality in water. From those analyses, the soils are loamy sand, sandy loam, loam and silty loam in texture. And, the sediments are slightly gravelly sand, gravelly sand and gravelly muddy sand in facies.

Metal contents in soils and sediments are of high near Hwasuneup and Hwasun coalfield. In peculiar, P, Co, Li, Ni, Zn and Pb exceed over crust mean contents. Physico-chemistry of above streams according to pH-Eh and Piper's diagrams indicates that the streams are, typically, assigned to natural river water. Water qualities of BOD, T-N and T-P in areas near Hwasun coalfield, Dongmyeon and Hwasuneup are polluted over V level.

Enrichment factor(EF) representing metal condensation in P, Cu, Zn and Pb appear near Hwasun coalfield and Hwasuneup from the soil and sediment samples, in part. Additionally, river water in dry season is very high in BOD, T-N, Na⁺ and SO₄²⁻. It is suggested that the relatively high metal contents in the stream be connected with above coalfield and urban areas.

Key words : environmental characteristics, soil, sediment, river water, Hwasun area

I. 서론

토양은 암석의 대기, 물, 생물체 등과 상호반응에 의해 풍화되어 형성된다. 그러나 상호 물질교환 과정 중에 오염물질이 토양 내에 유입되면 토양의 물리, 화학, 생물학적 작용에 의한 자정능력을 초과함으로써 토양오염을 야기 시키게 된다. 또한 토양에서 유실되어 하천으로 유입되는 유해물질들은 수질을 비롯한 수중생태계 및 하상에 퇴적되는 퇴적물을 오염시켜 수중 환경을 비롯한 전 지구적인 환경변화를 가져온다(Alloway, 1995; Thornton, 1983). 최근에 들어서 산업화 및 도시화에 따르는 토양 및 수질 오염문제가 하천에서도 대두됨에 따라 하천의 중요성이 크게 부각되고 있다(옥치상 등, 1999; 조해용·최창하, 2000; Berner and Berner, 1987). 하천에서 수질은 단기간에 걸친 하천환경의 특성변화를 반영한다면, 퇴적물에 함유되어 있는 중금속들은 하천수에 함유된 성분들에 비해 시간적 변화가 적고 상대적 함량이 높아 환경에 대한 영향을 지속적으로 평가하는데 비교적 유효한 지구화학적 매개체로 알려져 있다. 특히, 중금속의 존재형태와 물리화학적 변화에 따라서는 하천수 중으로 재용출되거나 퇴

적물 내로 침전되어질 가능성이 있기 때문에 하천환경에 대한 영향이 높다고 할 수 있다(Alloway, 1995). 따라서, 하천환경을 종합적으로 이해하기 위해서는 하천 주변의 토양, 수질뿐만 아니라 하상에 집적되는 퇴적물의 퇴적환경에 대한 연구 역시 중요하며, 이에 수반한 중금속들을 비롯한 지화화학적 성분들의 거동(geochemical behavior)을 살피는 것이 중요하다(조영길·김주용, 1998; 권용훈 등, 2000; 오강호, 2002).

화순천은 전남 화순군에 위치하고 있으며, 영산강 지류중의 하나인 지석천의 제 2 지류로써 화순군 동면 청궁리에서 발원하여 도곡면 미곡리에서 지석천으로 합류한다. 화순천의 수계는 수지상 하계망(dendritic drainage network)의 형태이며, 유로의 총연장이 28,64km로 그 유역면적은 123,8km²에 달한다. 화순천은 1905년 이후, 현재까지 무연탄을 채굴하는 화순탄광 지역에 인접해 있으며 신시가지로 확장되는 인구 밀집지역인 화순읍을 관류한다(Fig. 1). 화순천과 주변지역에 대한 기 연구들은, 이 하천이 탄전에 근접한 관계로 인해, 주로 지질학적 및 자원적인 측면의 연구(이돈영 등, 1965; 김봉균·박병권, 1966; 김규봉 등, 1990)가 진행되었으며, 광주화강암류에 대한 암석

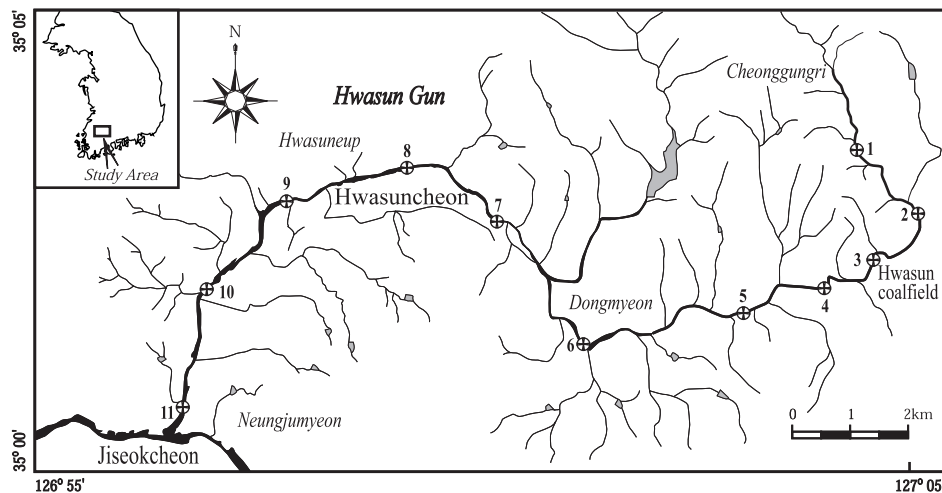


Fig. 1. Map showing the soils, sediments and river waters sampling sites and study area.

화학적 연구(박재봉, 1999), 영산강권역 수질보존과 관련된 국책연구 등(광주광역시, 1996; 전라남도, 1996; 건설부, 1990)이 일부 진행된 바 있다. 또한 화순천의 본류인 영산강에 대한 기존의 연구들은 영산강의 퇴적환경에 있어 퇴적물 중에 함유된 금속성분들에 대한 지구화학적 연구가 일부 진행되고 있으나(조영길·김주용, 1998; 오강호, 2002), 화순천 등의 지류를 대상으로 한 토양, 퇴적물 및 수질의 지구화학적 원소들의 거동을 이해하고 환경적인 요인과 관련된 성분들의 집중을 다룬 연구는 거의 수행된 바 없다.

따라서 이 연구는 영산강의 지류로 상류 수계를 이루고 있는 화순천을 대상으로 채취된 토양, 퇴적물에 대한 조직특성 및 지구화학적 연구와 하천수의 수질 성분들의 화학적 거동을 규명하는 한편, 도시화 및 산업화에 따른 유해 중금속들의 오염실태와 그 오염원인에 대하여 접근을 시도하였다.

II. 지질개관

영산강의 하계망이 전개되는 한반도 남서부는 선캄브리아기의 변성암류를 기반암으로 고생대 후기의 변성퇴적암류, 중생대 쥐라기의 화강암류들이 분포하고 있으며, 북동-남서 방향으로 전개되는 옥천습곡대 연변부를 따라 형성된 구조적

분지들에 중생대 백악기의 활발한 화성활동에 수반된 화산쇄설성 퇴적암류와 안산암을 비롯한 화산암류들이 광범위하게 노출되고 있다(이돈영 등, 1965; 김봉균·박병권, 1966; 김규봉, 1990; 박재봉, 1999; Chang, 1975; 장기홍, 1982).

영산강의 지류를 이루는 화순천이 관류하는 연구지역의 지질 역시 선캄브리아기의 편마암류를 기반암으로 하여 고생대 후기의 평안누층군에 대비되는 운모편암과 각섬석편암 등을 주로 하는 변성퇴적암류들이 부정합적으로 피복하고 있다. 선캄브리아기의 편마암류는, 화순천이 북쪽으로 굴곡하는, 화순읍과 동면 일대에 분포한다. 고생대 후기의 변성퇴적암류는 구봉산 일대에 소규모로 노출되며, 이 암층들은 비교적 변성도가 낮은 천매암과 편암류들로 구성되고 무연탄층이 협재되어 현재 채탄작업이 이루어지고 있다. 이들 암체들은 중생대 쥐라기의 흑운모화강암을 비롯한 대보화강암에 대비되는 광주화강암이 폭넓게 관입하고 있다. 이 광주화강암류는 화순천이 남쪽으로 흐르는 화순읍에서 능주면 일대의 저지에 주로 분포한다(Fig. 2). 이후, 활발한 중생대 백악기 화산활동에 수반하여 이루어진 두꺼운 화산쇄설성 퇴적층과 안산암을 비롯한 화산암류들이 전기한 백악기 이전의 암층들을 부정합적으로 피복하면서 연구지역에 광역적으로 분포한다. 이들

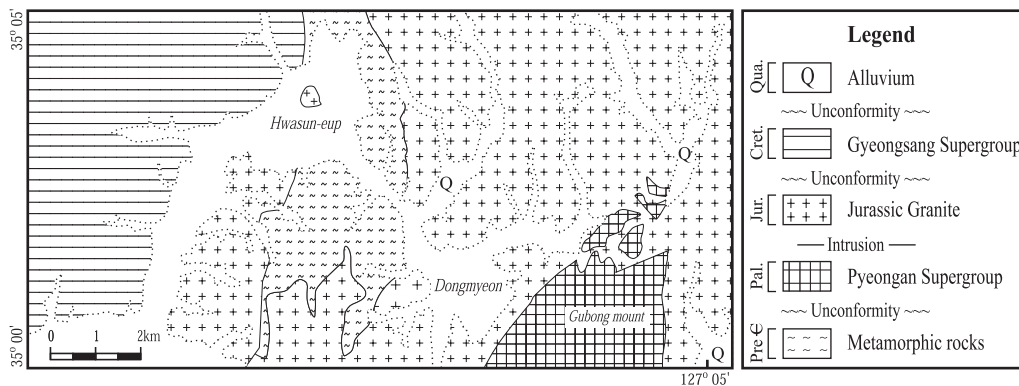


Fig. 2. Geological map in the study area (Modified after, Kim and Park, 1966; Kim et al., 1990).

화산쇄설성 퇴적암류들은 경상남북도 일원에 매우 넓게 분포하는 경상누층군의 유천층군에 대비되는 것으로 알려지며(김봉균·박병권, 1966), 라필리 응회암과 세립질응회암 등으로 이루어진다. 이 화산쇄설성 퇴적층에는 응회암질 사암과 셰일 등이 부분적으로 협재되며 안산암과 유문암 등의 화산암류에 의해 피복된다(고영구 등, 1995). 이들 화산쇄설성 퇴적암류는 화순천 유로의 북쪽 연변부를 따라 연구지역의 대부분에 분포하며 특히 화순군 동면과 동북면 일대에서는 매우 두꺼운 층후를 보인다. 부가하여 이들 암층들은 같은 시기의 산성 및 중성맥암류에 의해 관입당하고 있다.

III. 재료 및 방법

본 연구에 사용된 시료는 2001년 5월과 8월에 화순지역을 관류하는 하천을 중심으로 전라남도 하천도 및 1:50,000의 지형도를 이용하여, 하천을 대표할만한 지점을 선정 후, 발원지인 청궁리를 기점으로 화순천 지류를 따라 약 2~3km 간격으로 토양, 퇴적물 및 하천수를 채취하였다. 토양과 퇴적물 시료는 토성(soil texture), 퇴적물 조직(sediment texture) 및 지구화학적 분석을 위한 시료로 구분하여 전 처리를 실시하였다. 특히 지구화학적 분석을 위한 시료들은 금속 기기에 의한 오염을 최소화하기 위해 플라스틱 삽을 이용하여 표층 토양과 퇴적물을 채취하였으며, 약 1m 간격의 정방향으로 채취한 9 개의 부분시료를 합하여 하나의 완전시료로 사용하였다.

토양과 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. 사질의 입도는 표준체를 이용한 건식체질(dry sieving) 방법을, 니질은 침전속도를 이용한 피펫

법(pipetting method)으로 토양과 퇴적물의 입도별 함량을 구하였다. 한편, 토양은 미국 농무성(신영호, 1995)이 제안한 토성분류 방법으로, 퇴적물은 Folk(1968)에 의해 제시된 삼각도를 이용하여 토양 및 퇴적물의 유형을 분류하였다.

지구화학적 분석을 위한 시료는 70°C 이하로 건조기에서 충분히 건조시킨 후, 아게이트 모르타르(agate mortar)를 사용하여 200 mesh 이하의 크기로 분말화 한 후, 주성분 원소, 미량원소 분석 시료로써 사용하였다. 주성분과 미량원소 함량 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 및 Cd 등 14종의 총 23종의 원소를 분석하였다. 원소의 분석 시, 자료의 신뢰도를 검증하기 위해 동일시료에 대한 3회 중복분석을 병행하였으며, 그 결과는 $\pm 5\% \sim \pm 10\%$ 이내의 표준 편차를 나타냈다.

하천수 분석은 현장에서 휴대용 pH meter (Orion 290-A)와 DO meter(YSI 58)를 이용하여 pH(수소이온농도) 및 DO(용존산소량)를 현장에서 측정하였다. 또한, 채수된 하천수의 BOD, COD 등은 수질오염공정시험방법(환경부, 2000)에 의해, T-N, T-P는 UV(Ultra Violet: Shimadzu, Visible Recording Spectrophotometer 160A)를 이용하여 각각 220nm, 880nm에서 시료의 흡광도를 측정 한 후, 미리 작성한 검량선으로부터 T-N, T-P의 양을 구하여 농도를 산출하였다. SS는 여과지(GF/C; 0.45 μ m)를 이용하여 105~110°C의 건조기 안에서 2시간 건조시킨 후 항량으로 정확히 중량을 측정하였다. 하천수의 무기용존물질 및 중금속 분석의 경우, 양이온 및 중금속의 분석은 ICP(Induced Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometer: Jobin yvon 138)에 의한 유도결합플라즈마 방식을, 음이온은 IC(Ion Chromatograph: Shimadzu HIC-10A)를 이용한 이온크로마토그래

피법을 사용하여 분석하였다. 분석시 측정값의 정확도를 높이기 위해 동일시료, 표준액, 공시료에 대한 중복분석을 하였으며, 그 결과, 측정값의 표준편차는 ±10% 이하의 값을 보였다.

IV. 결과 및 토의

1. 토양 및 퇴적물의 조직특성

연구지역에서 채취된 토양과 퇴적물을 대상으

로 한 조직특성을 살펴보기 위하여 토양(신영호, 1995), 퇴적물(Folk, 1968)을 각각 삼각도를 이용하여 분류하였다. 토양은 사질양토(loamy sand), 양토(sandy loam), 미사질양토(loam), 미사토(silty loam) 등으로, 퇴적물은 미량의 역 함유 사((g)S), 역질 사(gS), 역니질 사(gmS) 및 사질 역(sG) 등의 퇴적상으로 나타났다(Table 1, Fig. 3). 토양에서 입도분포는 토지의 생산력과 유기 및 무기물의 투과성 등을 결정짓는 중요한 요인이다(전효택 외, 1998). 연구지역에서 토양은, 주

Table 1. Texture of soils and sediments in the study area.

Site	Distance	Soils				Sediments				
		Sand	Silt	Clay	Texture	Gravel	Sand	Silt	Clay	Texture
1	4.20	79.42	16.11	4.47	Loamy sand	7.93	79.65	6.56	5.85	Gravelly muddy sand
2	6.40	51.10	42.35	6.55	Sandy loam	24.87	65.17	5.71	4.25	Gravelly muddy sand
3	7.60	66.25	27.99	5.75	Sandy loam	2.55	88.57	4.50	4.38	Slightly gravelly sand
4	8.80	35.66	51.39	12.95	Silty loam	56.86	39.77	1.19	2.17	Sandy gravel
5	10.50	49.34	42.63	8.03	Loam	6.82	75.47	12.48	5.23	Gravelly muddy sand
6	13.80	55.19	35.69	9.12	Sandy loam	14.85	77.34	3.84	3.97	Sandy gravel
7	17.50	38.30	52.62	9.08	Silty loam	1.37	93.56	2.21	2.86	Slightly gravelly sand
8	19.90	70.88	25.64	3.48	Sandy loam	14.21	74.19	7.94	3.66	Gravelly muddy sand
9	21.70	57.87	34.74	7.39	Sandy loam	10.75	78.56	6.11	4.59	Gravelly muddy sand
10	24.60	47.92	43.50	8.58	Loam	45.88	51.53	0.84	1.74	Sandy gravel
11	28.10	39.04	49.79	11.17	Loam	26.60	68.69	1.91	2.80	Gravelly sand

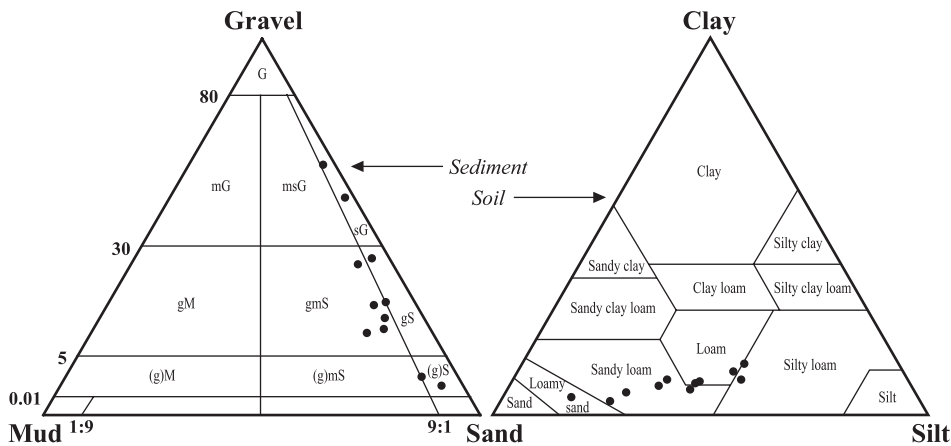


Fig. 3. Triangular diagram showing texture of sediments and soils in the study area.

로 논토양 및 밭토양이 분포하는 지역으로, 모래와 점토의 함량이 각각 85%, 15% 이하의 중립질로 식물 생장에 적합한 양질토양에 속하였다. 한편, 퇴적물은 전체적으로 조립질 퇴적물이 우세하여 상류쪽에서는 자갈을 많이 함유하고 있었으며, 화순읍 인근으로 내려오면서 지형 및 하상경사 등의 영향으로 자갈보다는 사질의 함량이 증가하였다. 퇴적물의 이러한 분포는 주변 고지에서 공급되어진 자갈을 많이 함유한 조립질 퇴적물의 영향이 크게 작용한 것으로 보이며, 화순읍 부근 등 평탄한 지역에서는 일시적으로 유속이 감소하여 사질의 함량이 증가했던 것으로 파악된다.

2. 토양 및 퇴적물의 금속원소 함량분포

연구지역 토양과 퇴적물 시료들을 대상으로 분석한 금속원소들의 함량은 중량 백분율과 ppm (part per million)으로 나타냈으며, Mason and Moore(1982)의 지각 평균함량값과 비교하였다 (Table 2). 토양에서 금속원소의 함량변화를 살펴보면, Al을 비롯한 주성분원소들은, 화순천의 발원지인 청궁리 지역에서 최대이며, 화순천 하류

의 능주 부근에서 최소로 나타나는 특징을 보인다 (Fig. 4). 이들 주성분 원소들은 상당히 불규칙하게 변화하나 대체로 상부역에서 하부역으로 다소 감소한다. 미량원소들은 주성분 원소들과 달리 일부 위치에 따른 변화상을 보인다. 중금속 원소들 중 대표적인 Co, Cu, Li, Ni 및 Zn은 화순탄광이 위치하는 하부에서 최대값을 나타냈다.

퇴적물에서 금속원소의 변화는 토양과 유사한 특징을 반영하였다. 주성분원소들은 화순천의 발원지인 청궁리 지역에서 최대이며, 화순천 하류의 능주 부근에서 최소로 나타났다. 미량금속원소들의 경우, 중금속 원소들 중 대표적인 Cu와 Pb는 화순탄광이 위치하는 곳에서 최대이며, 화순읍을 관통하는 지점에서도 상대적으로 높게 나타났다. Co, Ni 및 Zn은 화순탄광의 하부에서 최대값을 보이며, 다른 미량원소들과 같이 화순탄광을 지나는 지점에서도 비교적 높았다.

한편, 우리 나라 환경부(2001)에서 정한 토양오염 기준은 주성분 원소들의 함량변화보다는 Cd, Cu, Pb, Cr 등의 유해 중금속에 대한 기준을 설정하고 있다. 연구지역에서 분석된 토양과 퇴적물은 환경부가 설정한 토양오염우려기준과 비교시, 모든 유해 중금속이 기준치 이하로 나타났다.

Table 2. Metal contents of soils and sediments in the study area

	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	Ti	P	Mn	(%)														
											Ba	Co	Cr	Cu	Li	Ni	Sc	Sr	V	Y	Zn	Zr	Pb	Cd
											(ppm)													
	<i>Soils (sample 11)</i>																							
Min.	7.06	2.19	0.47	0.30	0.49	2.03	0.32	0.06	0.02	611	5	14	7	37	9	8	119	51	15	64	128	18	<1	
Max	9.30	4.13	0.79	1.14	1.77	2.72	0.61	0.18	0.11	828	60	59	44	109	94	15	230	109	28	261	217	36	1	
Aver	7.77	2.93	0.58	0.52	0.85	2.40	0.42	0.08	0.05	738	16	36	19	56	29	11	152	67	20	101	177	23	-	
SD	0.72	0.61	0.11	0.23	0.34	0.22	0.09	0.04	0.03	78	19	13	12	24	30	2	32	17	4	59	29	5	-	
	<i>Sediments (sample 11)</i>																							
Min.	3.40	1.43	0.14	0.14	0.16	1.65	0.14	0.03	0.03	449	4	13	5	21	7	4	98	25	8	29	79	14	<1	
Max	8.33	4.61	0.92	1.04	1.22	3.13	0.51	0.08	0.09	922	31	32	50	64	48	13	229	92	25	101	183	41	<1	
Aver	5.94	2.43	0.42	0.53	0.82	2.31	0.25	0.04	0.05	667	14	25	17	42	20	7	154	49	15	68	149	24	-	
SD	1.19	0.89	0.20	0.28	0.32	0.42	0.11	0.02	0.02	133	8	5	12	15	13	2	42	19	5	23	30	8	-	
	<i>mean crust value (modified after, Mason and Moore, 1982)</i>																							
	8.13	5.00	2.09	3.63	2.83	2.59	0.44	0.11	0.10	425	25	100	55	20	75	22	375	135	33	70	165	13	0.2	

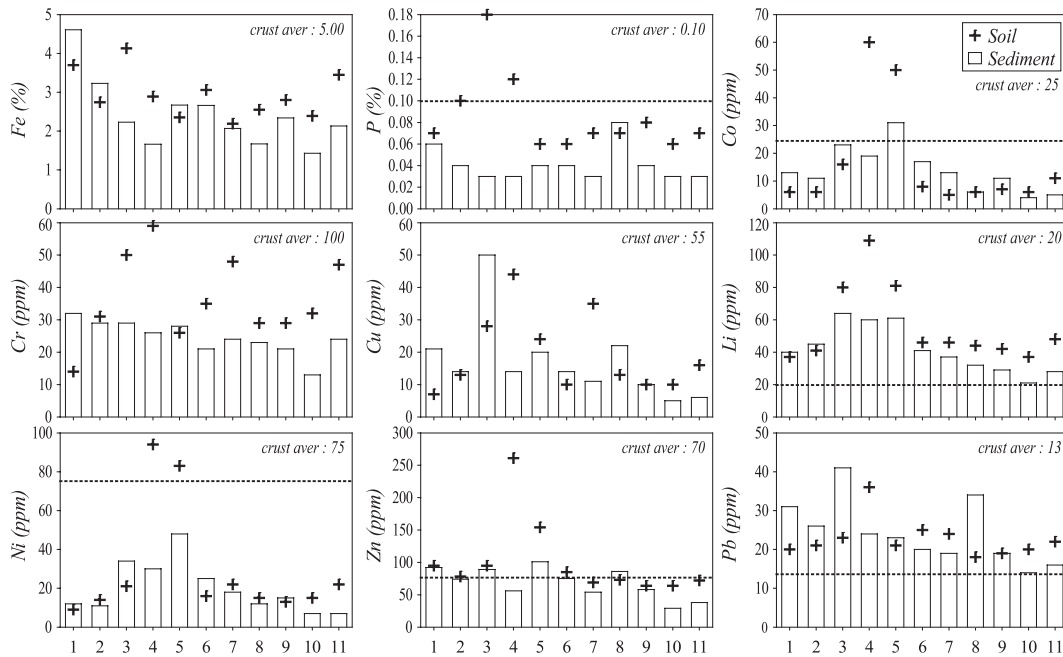


Fig. 4. Variations of metal contents in soils and sediments from the study area.

3. 하천수의 물리·화학적 특성

연구지역 하천수에서 측정된 pH-Eh diagram에 의한 물리적 특성은 일반적인 자연수의 범위 내에 존재한다(Fig. 5). 이들 지역에서의 pH-Eh의 변화는 미세하지만 상류와 유속이 비교적 빠른 곳에서는 산화환경으로, 하류 방향 및 유속이 정체되는 일부 지역에서는 환원환경을 보인다. 연구지역 하천수의 무기이온들의 함량분포는 Table 3에 나타냈으며, 화학적 특성의 변화를 살펴보기 위해 양이온과 음이온의 농도를 당량으로 환산하여 Piper's diagram에 도시하였다(Fig. 6). 하천수에서 분석되어지는 무기이온들은 암석의 풍화, 대기로부터의 유입 또는 인간활동에 의한 영향으로 인해 생성되어지며 하천수의 이온변화에 많은 영향을 준다(Berner and Berner, 1987; 서혜영 · 김규환, 1997). 화순천에서 채수된 하천수의 무기이온들의 분포는, 갈수기에 양이온 영역에서

Na⁺+K⁺가 주된 유형으로, 홍수기에는 Na⁺+K⁺와 Ca²⁺의 중간형으로 이동하였다. 음이온은 갈수기에 화순탄전을 중심으로 SO₄²⁻가 우세한 형

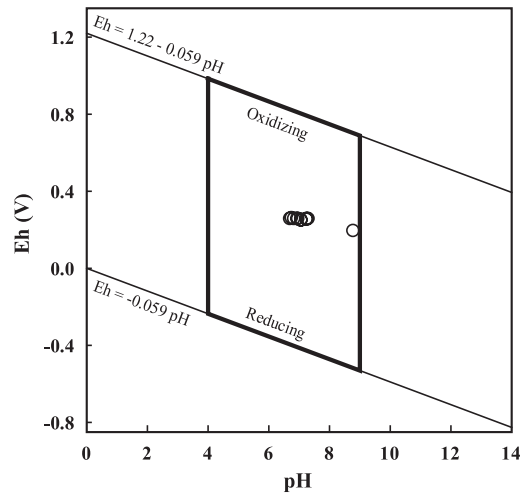


Fig. 5. pH-Eh relationships of river water samples in the study area.

Table 3. Chemical constituents of water samples in the study area.

	pH	Eh (mV)	DO	BOD	COD	T-N	T-P	SS	Mg	Ca	Na	K	HCO ₃	F	Cl	NO ₃ -NSO ₄	As	Se	Zn	Cd	Pb	Cu	Cr	
River waters (Dry season; sample 11)																								
Min.	6.95	195	2.78	1.21	2.18	0.08	0.00	1.60	2.32	7.34	3.57	0.77	36.60	0.04	7.66	0.32	4.55	0	0	1	0	0	1	0
Max	8.39	260	7.81	9.43	17.84	7.65	0.53	26.00	12.30	15.70	39.80	5.80	162.26	0.46	29.27	3.69	340.30	17	1	8	0	1	5	1
Aver	7.39	250	5.44	4.31	8.24	3.06	0.14	10.04	6.13	12.24	17.10	3.77	73.31	0.18	19.42	2.11	110.95	-	-	5	-	-	3	-
SD	0.42	19	1.40	3.05	5.83	2.03	0.16	7.25	3.54	2.69	10.86	1.33	35.20	0.12	6.55	1.16	124.88	-	-	3	-	-	2	-
River waters (flood season; sample 11)																								
Min.	6.69	-	5.50	0.80	2.36	1.50	0.00	7.20	1.18	4.86	1.92	0.73	21.96	0.11	5.60	1.62	0.00	0	0	9	0	0	2	0
Max	8.79	-	7.30	2.04	6.22	2.08	0.43	48.20	6.76	9.98	8.65	1.68	32.94	0.18	11.00	2.87	66.42	0	0	26	0	1	10	1
Aver	7.17	-	6.37	1.22	3.44	1.79	0.14	16.85	3.00	6.95	4.39	1.35	27.84	0.14	7.21	1.95	22.70	-	-	15	-	-	4	-
SD	0.57	-	0.47	0.34	1.11	0.23	0.18	11.89	1.72	1.59	2.09	0.37	4.59	0.02	1.66	0.36	20.09	-	-	5	-	-	2	-

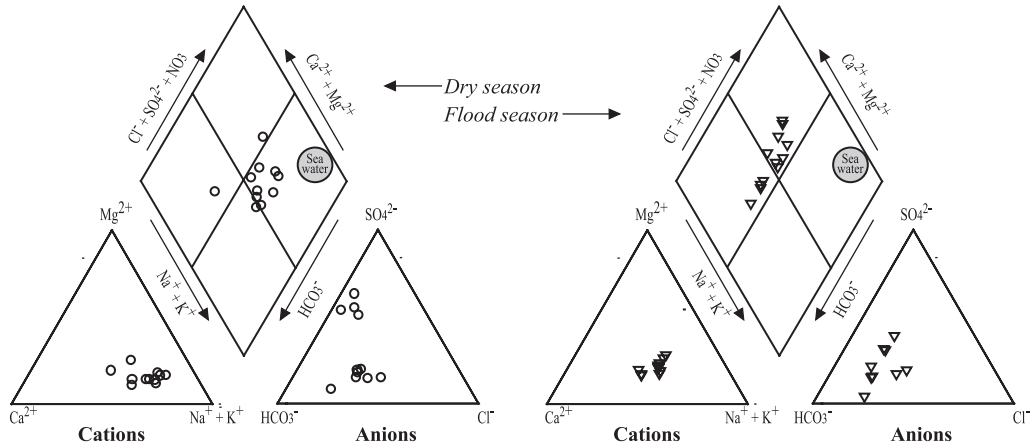


Fig. 6. Piper diagram showing the chemical compositions of river water in the study area.

태로 나타나는 특징을 보였으며, 홍수기에는 HCO₃⁻가 지배적인 형태로 나타났다. 이는 화순천의 수질이 화순탄전 등의 주변 지질의 영향을 받아 갈수기에는 SO₄²⁻를 비롯한 Na⁺+K⁺의 함량이 높게 나타나며, 홍수기에는 강수에 의한 희석 작용으로 인하여 상대적으로 HCO₃⁻ 및 Ca²⁺의 함량 변화가 나타나는 것으로 판단된다.

4. 하천수의 성분함량 변화

우리 나라 환경부(2001)에 의한 하천수 수질환경기준은 pH를 비롯한 DO, BOD 및 SS의 기준만

이 설정되어 있을 뿐, COD와 하천 및 호소에서 부영양화를 일으키는 T-N, T-P 등의 기준은 포함되어 있지 않다(오창완 등, 2002). 하지만 화순천은 최종적으로 호소환경인 영산호로 유입되어 영산호의 COD, T-N, T-P 오염에 중요한 역할을 하게 된다. 따라서 본 연구에서는 pH, DO, BOD와 SS는 하천수 수질환경기준치를, COD, T-N, T-P 등은 호소수 수질환경기준치를 이용하여 비교하였다(Fig. 7).

갈수기에 분석되어진 DO는 동면초교 부근(정점 5)에서 7.81mg/l로 하천수수질환경기준 I등급에 해당하였으나, 대부분의 지역에서 2.78-

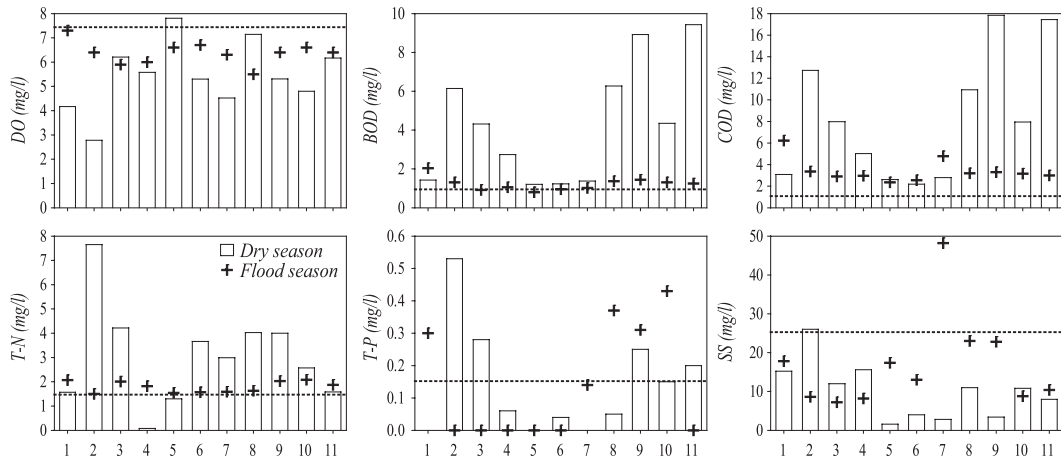


Fig. 7. Variations of DO, BOD, COD, T-N, T-P and SS contents in study area.

7.14mg/l로 I등급 이하의 수질을 보였다. 홍수기에 DO는 다소 증가하는 경향을 보여 대다수 지역이 5.50-7.30mg/l의 II-III등급으로 향상되었다. BOD는 갈수기에 화순탄광 부근(정점 2-4)에서 2.74-6.14 mg/l, 화순읍을 관류하는 하류부근(정점 8-11)에서 4.35-9.43mg/l로 하천수수질환경기준 III등급을 초과하였으나, 홍수기에는 전 지역이 2mg/l 이하로 갈수기에 낮은 값을 보이며 균질화되는 현상을 보였다. COD를 비롯한 T-N과 T-P는, 전술한 바와 같이, 하천수수질환경기준이 설정되지 않아 호소수수질환경기준을 참조하여 평가하였다. 연구지역에서 조사된 COD는 BOD의 경향과 유사한 함량변화를 보인다. 갈수기에 COD는 BOD의 함량이 높게 나타난 지점들에서 10mg/l 이상의 높은 함량을 보였으며, 호소수수질환경기준 V등급에 해당되는 것으로 나타났다. 갈수기에 T-N은 화순탄전 부근과 하류 부근에서 호소수수질환경기준 V등급인 1.5mg/l보다 높은 함량치를 나타냈다. 화순천 주변은 대부분 농경지로서 T-N의 함량이 높은 것은 비료 등의 살포에 의한 가능성이 크며, 이와 더불어, 인간활동에 의한 생활하수의 영향이 작용한 결과로 보여진다. 홍수기에 T-N의 함량은 갈수기에 비해 상당히 감소하는 경향을 보였으나

1.50-2.08mg/l로 역시 호소수수질환경기준 V등급에 해당되었다. T-P는 T-N의 경향과 유사한 함량변화를 보이며, 호소수수수질환경기준 V등급을 초과하였다. 이러한 원인은 T-N의 함량변화에 영향을 미쳤을 것으로 보이는 비료 등과 생활하수 등의 영향이 복합적으로 작용한 결과로 보여진다. 이와 달리, 홍수기에 T-P는 화순읍을 관류하는 부근에서 증가하여 하천수에서 분석된 항목들과는 다른 해석을 받게 한다. 이는 T-P의 함량이 증가하게 된 원인으로 화순읍의 생활하수 유입과 더불어 토양 유실 등에 의한 영향이 함량변화에 관여한 것으로 해석된다. SS는 갈수기에 대부분의 지역이 하천수수질환경기준 I등급인 25mg/l 이내로 나타났으며, 홍수기에는 증가하는 경향을 보였다. SS는 하천 바닥에 침전되어 있는 세립질 퇴적물이 교란작용 등에 의해 부유함으로써 증가한다. 연구지역에서 SS의 농도 변화는 교란작용에 의한 일부 정점에서의 국부적인 증가와 홍수시 강우에 의한 세립질 퇴적물의 부유로 보여진다.

한편, 연구지역 하천수에서 분석된 As, Se, Zn, Cd, Pb, Cu, Cr 등의 중금속은 하천수수질기준인 50 μ g/l 이하의 값을 보이거나 불검출되어 중금속에 의한 화순지역 하천수의 오염은 없는 것으로

보여진다. 중금속 중 특징적인 함량변화를 보이는 원소로는 As로 화순탄전이 위치하는 지역에서 갈수기에 $17\mu\text{g}/\text{l}$ 의 비교적 높은 값을 나타냈다. 또한 As와 비슷한 거동을 보이는 SO_4^{2-} 의 경우, 연구지역에서 분석되어진 음이온 중 가장 큰 변화를 보이며, 북암리의 화순탄전 부근에서 $340\text{mg}/\text{l}$ 의 높은 값이 나타나 탄전의 영향이 크게 미치고 있음을 시사하였다.

5. 성분함량 변화의 요인 및 관련성

토양 및 퇴적물 내의 금속원소 함량 변화는 주변지질, 유기물, 산화물 및 입도 등의 영향을 비교적 잘 받는 것으로 알려져 있으며(Förstner and Wittmann, 1981; Salomons and Förstner, 1984; Adriano, 1986; Horowitz, 1991), 이와 유사한 연구 결과는 우리나라에서도 이미 보고된 바 있다(조영길·김주용, 1998; 오강호, 2002; Lee *et al.*, 1991). 연구지역 토양 및 퇴적물에서 금속원소 함량 변화는 이러한 여러 요인들의 복합적인 결과일 것으로 보이며, 요인들의 영향을 해석하기 위해서는 주변지질과 지형을 비롯한 유기물 및 입도 등에 대한 영향을 고려할 필요가 있다. 특히 주변 암석들의 지화학적인 성분들은 풍화와 침식에 의해 토양과 퇴적물에 많은 영향을 주기 때문에 이에 대한 함량 변화를 살펴보는 것이 필요하다. 화순천 주변 지질에 가장 큰 영향을 주는 암체로는 중생대 유라기의 흑운모화강암인 광주화강암으로 Mg, Ca 및 Na 등의 주성분원소와 미량 원소인 Sr 및 V의 경우 이 화강암에서 비교적 높은 값을 보이거나(박재봉, 1999), Zr, Zn 및 Cu 등은 토양과 퇴적물에서 상대적으로 높은 값을 나타냈다. 이는 광주화강암이 생성된 후, 풍화와 침식을 받아 토양과 채설성 퇴적물로 퇴적되면서 유수에 의해 일부 금속이 용출되어진 결과로 보인다. 반면에, 풍화와 침식에 상대적으로 강한 Zr, Zn 및 Cu 등의 중금속 원소들은 잔류하여 비교적 높은

함량을 나타내는 것으로 판단된다.

반면, 주변 지질을 구성하는 암석의 영향과 풍화 이외의 요인들로서, 인간활동에 의한 생활하수 및 농업용수 등에 의한 유기물의 영향을 들 수 있다. P의 경우 대표적인 생활하수 등에 의한 오염물질로 유기물에 다량 함유되며, Cu, Zn, Pb 등의 중금속원소들과 함께 유기물에 흡착되는 특성을 보인다(Irving and William, 1948). 이는 연구지역 토양과 퇴적물에 있어 금속원소 함량분포를 조절하는 요인으로 유기물이 일부 작용하고 있음을 시사한다. 한편, 입도의 세립화에 따른 금속원소 함량의 증가는 세립질 퇴적물을 구성하는 점토광물들의 주성분 및 세립질 퇴적물 내의 금속원소 흡착과 관계되는 것으로 판단된다(Förstner and Wittmann, 1981; Salomons and Förstner, 1984).

하천수의 수질은 조사시기에 따른 많은 차이가 발생하며, 인위적인 오염을 제외하면, 화학성분은 강수의 성분과 주변지역의 지질에 의한 영향을 크게 받는 것으로 알려져 있다(황선출 등, 1996). 즉 하천수의 화학성분 기원은 강수, 대기중의 에어로졸 등의 분진, 하천 수계 주위의 암석과 토양에서 유출된 원소 등에 따라 결정되며, 인간활동 등에 의한 생활하수, 농업용수, 공업용수, 광산폐수, 온천폐수, 농약 등의 유입으로 하천수 수질이 변화하게 된다(전효택 등, 1998). 특히 집중호우와 같은 많은 강수는 하천수의 수질 및 용존무기물질 등을 희석시켜 함량분포에 많은 변화를 초래한다. 이러한 강수에 의한 희석효과는 연구지역에서 BOD, COD, T-P 및 용존무기물질 등이 갈수기에 비해 홍수기에 감소하거나 균질화되는 것으로도 알 수 있다.

또한, 생활하수 및 농업용수 등에 의한 유기물질들은 BOD, COD, T-N 및 T-P 등의 함량변화를 가져와 상류의 마산리 부근, 화순읍을 관류하는 지역과 지석천에 합류되는 죽청리 부근에서 높은 값의 농도를 보이는데, 이러한 분포는 유기물들이 수질에 많은 영향을 주고 있음을 시사하

기도 한다. 반면, SO_4^{2-} 의 경우, 연구지역에서 분석되어진 음이온 중 가장 큰 변화를 보이며 복암리의 석탄공사 부근에서 340mg/l의 높은 값을 나타냈다. 일반적으로 SO_4^{2-} 는 철광과 탄광의 갱내수 중에 높은 농도로 함유되어져 있으며, 공업폐수 및 생활하수의 유입으로 인해 증가되어지는 것으로 알려져 있다(최석원, 김억수, 1996). 화순천 및 영산강 수질에서 나타나는 SO_4^{2-} 의 농도가 평균 50mg/l 내외의 값을 나타내는 것과 비교하여 볼 때(오강호, 2002), 탄전을 지나는 하천수에서 SO_4^{2-} 의 농도가 높게 나타나는 것은 인위적인 요소보다 탄전을 비롯한 주변 지질에 의한 농도 변화일 가능성이 있다. 이는 Piper's diagram에 의한 하천수의 화학적 특성에서도 나타난 결과로, 음이온 영역에서 SO_4^{2-} 가 우세한 것은 화순천의 수질이 화순탄전 등의 주변 지질의 영향을 받고 있음을 시사하기도 한다.

이처럼 연구지역 토양, 퇴적물 및 하천수에 많은 영향을 주는 요인은 주변지질의 영향, 풍화·침식에 의한 영향, 생활하수 등에 의한 유기물 영향 및 입도의 영향 등이 복합적으로 작용하는 것으로 보여지며, 부가적으로 하천 흐름의 영향까지 고려해야할 것으로 생각된다. 특히, 암석의 풍화작용 등에 의한 무기염류나 탄산염 광물의 용해 등은 하천수의 주요 이온 성분들의 분포에 작용한 결과일 것이다(서혜영 · 김규한, 1997; Stallard and Edmond, 1983; Sarin *et al.*, 1989).

6. 토양-퇴적물-하천수의 오염평가

연구지역 토양 및 퇴적물 내의 금속원소의 오염 또는 인위적인 영향 등을 파악하기 위해서 Bruland *et al.*(1974)에 의한 부화계수(enrichment factor: EF)와, 하천수를 대상으로 Kerndorff *et al.*(1992)에 의한 오염지수(contamination index: CI)를 구하였다. 부화계수는 토양 및 퇴적물 내 점토광물의 구성비율과 미량원소의 상대적인 함

량변화를 이용하여 금속원소 농축평가에 사용되며(김주용 외 2001; 오강호, 2002), 하천수의 오염지수는 주변의 오염되지 않은 하천수를 바탕값(background value)으로 특정오염원에 대한 오염평가에 사용된다. 본 연구에서 부화계수의 보존성원소로 연구지역에서 상대적으로 함량 변화 및 편차가 작은 Al을, 지각 평균값은 Mason and Moore(1982)에 의한 클라크 수를 사용하였으며, 하천수의 오염지수 바탕값(background value)으로는 화순천의 발원지인 청궁리에서 채수된 하천수(정점 1)를 사용하여 유해 중금속 및 수질오염원에 대한 오염도를 평가하였다(Fig. 8).

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

$$CI = \frac{\text{Material(sample value)}}{\text{Material(background value)}}$$

연구지역 토양과 퇴적물에서 P, Cu, Zn 및 Pb 등의 부화계수를 살펴보면 화순탄전 주변과 화순읍 부근에서 부화되는 특징을 보인다. 주성분원소인 P와 Cu, Zn 및 Pb 등의 미량원소는 환경유해원소로써 널리 알려져 있으며, 토양 및 하천의 기능을 저하시켜 작물 및 수중생물의 생태와 환경을 파괴하며, 궁극적으로는 인체에 유해한 요인으로 작용할 수도 있다(Aston, 1974; Wittmann, 1983; Horowitz, 1991). 연구지역의 특정지역인 화순탄전, 화순읍의 토양과 퇴적물에서 유해원소들이 부화되는 원인은 석탄채광 및 도시화의 영향이 큰 요인으로 작용하는 곳으로 파악된다. 하천수의 경우, 갈수기에 오염지수는 BOD, T-N, Na^+ 및 SO_4^{2-} 등이 바탕값의 함량과 비교할 때, 매우 높은 대조를 보여 오염지시인자(contamination indicator)로 적절한 것으로 판단된다. BOD는 화순탄전 위 상류와 화순읍을 관류하는 하류 방향에서 비교적 높은 값을 보였으며, SO_4^{2-} 는 화순탄전을 관류하면서 급격히 부화되는 특징을 보였다. 한편, 홍수기에는 SO_4^{2-} 를 제외한 오염지시인

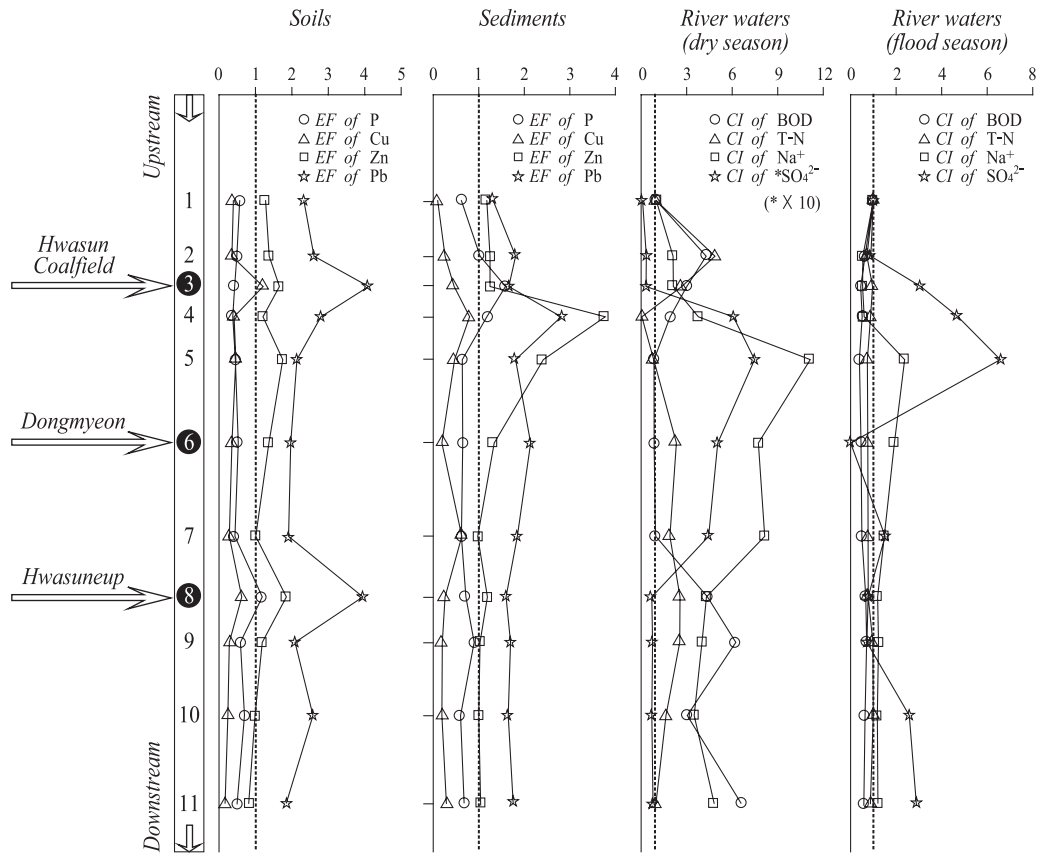


Fig. 8. Contamination flow from the soils, sediments and river waters in study area.

자들이 균일화되는 특징을 나타냈다.

전술한 결과를 살펴보면, 화순탄전 주변과 화순읍을 관류하는 지역에서 토양, 퇴적물에 함유된 P, Cu와 Zn 등의 지화학적인 거동과, 하천수의 지시인자인 BOD, Na⁺ 및 SO₄²⁻ 등의 변화가 유사하게 부화되는 것을 알 수 있다. 이는 Perelman(1967)이 제시한 원소들의 상대적인 이동도와도 잘 부합되며, 금속원소들의 함량분포에 탄층이나 인구밀집지역인 화순읍의 영향이 크게 작용한 것으로 해석된다. 즉, 화순천에서 나타나는 지역적 오염 요인은 산업화 및 도시화 등에 의한 영향과 더불어 생활용수 및 농업용수에 의한 인위적인 간섭요인이 복합적으로 작용하고 있음을 시사하고 있다.

V. 결론

1. 연구지역에서 토성은 사질양토, 양토, 미사질양토, 미사토 등의 중립질로 식물 성장에 적합한 양질토양에 속하였으며, 퇴적물은 미량의 역 함유 사, 역질 사, 역니질 사 및 사질 역 등의 퇴적상으로 조립질 퇴적물이 우세하게 나타났다.
2. 토양에서 Co, Cu, Li, Ni 및 Zn은 화순탄전 부근에서 높은 함량을 보였고, 퇴적물은 Co, Ni 및 Zn이 화순탄전과 화순읍 부근에서 높은 값을 보였으나, 환경부의 토양오염우려기준보다는 낮게 나타났다.
3. 하천수의 pH-Eh diagram에 의한 물리적 특

성은 일반적인 자연수의 범위 내에 존재하며, Piper's diagram에 의한 화학적 특성은 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 와 SO_4^{2-} 가 우세한 형태로 화순탄전에 의한 영향을 크게 반영하였다.

4. 하천수 수질은 갈수기에 화순탄전 및 화순읍 부근에서 BOD 9.43mg/l, COD 17.84mg/l, T-N 7.65mg/l, T-P 0.53mg/l로 일부 지역에서 수질환경기준 V등급으로 오염되었으나, As, Se, Zn, Cd, Pb, Cu, Cr 등은 하천수수질기준 50 $\mu\text{g/l}$ 이하 또는 불검출되어 중금속류에 의한 오염은 없었다.

5. 종합적인 오염정도를 파악하기 위한 토양, 퇴적물의 부화계수는 P, Cu, Zn 및 Pb 등이 화순탄전 주변과 화순읍 부근에서, 갈수기에 하천수 오염지수는 BOD, T-N, Na^+ 및 SO_4^{2-} 등이 동면농공단지와 화순읍 부근에서 높게 나타났다. 이는 연구지역에서 토양, 퇴적물, 하천수의 오염이 산업화, 도시화 등에 의한 영향과 생활하수 및 농업폐수 등에 의한 간접요인에 의해 복합적으로 작용하여 나타난 결과로 파악된다.

참고문헌

- 건설부, 1990, 수자원 장기종합계획(1991-2011), 89.
- 고영구, 김정길, 김주용, 김해경, 유경아, 1995, 전남 화순군 이서면 일대에 분포하는 백악기 퇴적암류에 관한 연구, 한국지구과학회지, 17, 64-74.
- 광주광역시, 1996, 영산강수질관리 종합대책수립에 관한 연구, 409.
- 권용훈, 성금수, 황갑수, 장재철, 2000, 만경강·동진강 유역의 토양, 현미, 저질토층의 중금속 함량 및 분포, 환경영향평가, 9, 143-153.
- 김규봉, 이병주, 황상구, 1990, 광주도폭지질보고서(1:50,000), 한국동력자원연구소, 20.
- 김봉균, 박병권, 1966, 동북도폭(1:50,000), 국립지질조사소, 33.
- 김주용, 은고요나, 고영구, 윤석태, 오강호, 김동주, 2001, 전남 나주-영암지역의 영산강 하류 시추퇴적물의 퇴적환경과 지구화학적 특성, 한국지구과학회지, 22, 301-317.
- 박재봉, 1999, 광주화강암류에 대한 암석학적 연구, 전남대학교 대학원 박사학위논문, 145.
- 서혜영, 김규한, 1997, 한강수계분지내 하천수의 지구화학적 특성, 지하수환경, 4, 130-143.
- 신영호, 1995, 토양분류지침, 한림저널사, 541.
- 오강호, 2002, 영산강 유역 퇴적환경과 하천수 및 퇴적물의 오염, 전남대학교 대학원 박사학위논문, 195.
- 오창완, 이지선, 김강주, 황갑수, 2002, 전주시 하천의 BOD, COD, 총질소, 총인에 대한 수질 현황 및 오염원, 자원환경지질, 35, 43-54.
- 옥치상, 이주상, 박홍석, 백병천, 이병인, 1999, 수질 및 수자원 관리, 도서출판 대학서림, 606.
- 이돈영, 정춘식, 최선근, 남원희, 이석중, 1965, 호남탄전지질조사보고서, 대한석탄공사, 54.
- 장기홍, 1982, 상부중생대층(백악계-경상누층군): 한국의 지질과 광물자원, 김옥준교수 정년 퇴임기념 논문집, 113-131.
- 전라남도, 1996, 영산강 수질개선 종합대책 수립에 관한 연구, 668.
- 전효택, 문희수, 김규한, 정명채, 1998, 환경지질학, 서울대학교출판부, 529.
- 조영길, 김주용, 1998, 영산강 하상퇴적물의 중금속 함량, 한국환경과학회지, 7, 281-290.
- 조해용, 최창하, 2000, 곡교천 주변의 토양과 자생생물의 중금속분포에 관한 연구, 환경영향평가, 9, 339-348.
- 최석원, 김억수, 1996, 의학환경 지구화학, 도서출판 춘광, 434.
- 환경부, 2000, 수질오염공정시험방법, 환경부, 2000, 407.
- 환경부, 2001, 환경통계연감, 644.
- 황선출, 정성욱, 박원우, 김우성, 이봉현, 박홍재, 1996, 낙동강 하류의 하상구조와 오염물질

- 과의 상관관계 연구, 한국환경과학회지, 5, 481-494.
- Adriano, D. C., 1986, Trace Elements in the Terrestrial Environment, Springer-Verlag, 533.
- Alloway, B. J., I. Thornton, G. A. Smart, J. C. Sherlock, and M. J. Quinn, 1988, Metal Availability, *Sci. Tot. Environ.*, 75, 41-69.
- Aston, S. R., I. Thornton, J. S. Webb, J. B. Purves, and B. L. Milford, 1974, Stream sediment composition, an aid to water quality assessment, *Water Air and Soil Pollution*, 3, 321-325.
- Berner, E. K. and R. A. Berner, 1987, The global water cycle, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New York, 397.
- Bruland, K. W., K. Bertine, M. Koide, and E. D. Goldberg, 1974, History of metal pollution in southern California coastal zone, *Environ. Sci. Tech.*, 8, 425-432.
- Chang, K. H., 1975, Cretaceous stratigraphy of Southeast Korea, *Jour. Geol. Soc. Korea*, 11, 1-23.
- Folk, R. L., 1968, Petrology of Sedimentary Rock, Hemphill's, 170.
- Förstner, U. and G. T. W. Wittmann, 1981, Metal Pollution in the Aquatic Environment, Springer-Verlag, 486.
- Galehouse, J. S., 1971, Sedimentation analysis, in Carver, R. E.(ed.), *Procedures in Sedimentary Petrology*, Wiley-Interscience Co., 69-94.
- Horowitz, A. J., 1991, A Primer on Sediment-Trace Element Chemistry, Lewis Publishers, Chelsea(MI), 136.
- Ingram, R. L., 1971, Sieve analysis, in Carver, R. E. (ed.), *Procedures in Sedimentary Petrology*, Wiley-Interscience Co., 49-68.
- Kerndorff, H., R. Schieyer and G. Milde, 1992, Geochemistry of groundwater pollutants at German waste disposal sites, in Lesage, S. and R. E. Jackson(eds.), *Groundwater Contamination and Analysis at Hazardous Waste Sites*, Marcel-Dekker Inc., 245-271.
- Lee, C. B., Y. A. Park, H. J. Kang and D. C. Kim, 1991, Geochemical characteristics of the continental shelf and slope sediments off the southeastern coast of Korea, *Kor. Jour. Quat. Res.*, 5, 15-31.
- Mason, B. and C. B. Moore, 1982, *Principles of Geochemistry*, John Wiley & Sons Inc, New York, 344.
- Perel' man, A. I., 1967, *Landscape Geochemistry* (Translation No. 676, Geological Survey of Canada, 1972), Vysshaya Shkola, Moscow, 1-338.
- Salomons, W. and U. Förstner, 1984, Metals in the Hydrocycle, Springer-Verlag, 349.
- Sarin, M. M., S. Krishnaswami, K. Dilli, B. L. K. Somatajulu and W. S. Moore, 1989, Major ion chemistry of the Ganga-Brahmaputra river system : Weathering processes and fluxes to the Bay of Bengal, *Geochem. Acta.*, 53, 997-1009.
- Stallard, R. F. and J. M. Edmond, 1983, Geochemistry of the Amazon 2. The influence of geology and weathering environment on the dissolved load, *Jour. Geophy. Res.*, 88, 9671-9688.
- Thornton, I., 1983, *Applied Environmental Geochemistry*, Academic Press, London, 501.
- Wittmann, G. T. W., 1983, *Metal Pollution in the Aquatic Environment*, Springer-Verlag, Berlin, 486.