대한위생학회지. 제14권 제3호(1999)
Korean J. Sanitation. Vol. 14, No. 3, pp71~79(1999)

한강유역 주요지천의 저질내 중금속 분포

허준무 · 박종안*
(주)새로운 환경 기술연구소 · *순천향대학교 환경보건학과

Characteristics of Heavy Metal Distribution in Bottom Sediments of Tributaries of the Han River

Joon-Moo Hur · Jong-An Park*
New Environment Research Engineering Co.
**Dept. of Environmental Health Science, Soonchunhyang University*

Abstract

The Hg, Cd, Cu, Pb, Mn, and Zn in bottom sediments of han river and their tributaries were analyzed to evaluate the seasonal variations of heavy metals. Leaching tests were also performed for estimation of availability of heavy metal retention in sediments. Sediments of Anyang stream showed the highest concentration of heavy metal in the sediment samples. Heavy metal concentration was heavily depended upon the heavy metal source of tributaries of Han river and particle distribution. Clay and silt had higher concentration of heavy metals than very fine sand and fine sand due to difference of retention capability of heavy metal. The highest concentration of heavy metal was observed at spring season, but significant variations of heavy metal concentration was not observed in bottom sediments irrespective of sites investigated. Heavy metals and ignition loss showed positive relations, and higher relationships with p-value <0.01 were observed between copper and lead, copper and zinc, and copper and mercury. Leaching of heavy metals from the bottom sediments was heavy depended on the pH condition of leaching test, and leachated fraction increased with decrease of the pH.

Keyword : Heavy metal, bottom sediment, Han river, clay & silt

I. 서 론

하천 및 호소의 오염퇴적물은 오염물질이 축적되는 곳으로 오염물질의 저장소역할을 수행하며, 수질, 생태계 및 인체에 지속적인 영향을 미친다. 지난 수 십년간 하천으로 유입된 유기물, 유해화학물질 및 중금속 등을 비롯한 오염물질은 하류로 운반되면서 비교적 흐름이 완만한 곳에 퇴적되어 축적되어 왔다. 이처럼 오염된 퇴적물은 정체된 호소 전반에 걸쳐 지속적으로 수질에 악영향을 미치게 되지만 광범위하게 분포하기 때문에 오염퇴적물을 효과적으로 관리 및 처리하는 것을 매우 어렵다. 그럼에도 불구하고 최근까지 호소 및 하천 수질개선 문제를 논의할 때 오염퇴적물의 처리문

재가 주된 관심사항이 되지 못하였다. 일차적인 이유로는 오염퇴적물을 수질오염의 결과로 인식하여 수질악화의 원인이 될 수 있다는 사실을 간과했기 때문이고 이차적으로는 수중생태계에 미치는 영향에 대한 전반적인 이해 부족 때문이다. 미국의 경우 근린만에서 포획된 어류 내에 축적된 PCBs의 90%이상이 그린만내의 폭스강의 퇴적물에서 비롯됐다고 발표되었다[1]. 이에 미국 EPA에서는 1987년 맑은물법 개정이래 오염퇴적물의 적절한 관리방안에 관한 연구를 시작했고 그 결과 1994년에 종합적인 오염퇴적물 관리방안을 수립, 추진중에 있다. 우리나라도 팔당상수원의 오염문제가 심각해지면서 오염퇴적물에 대한 관심이 대두되었고 부분적인 연구가 수행되고 있으며 저질의 오염도가 수질과 더불어 수질오염현상을 파악하는데 중요한 지표로 인식되어져 가고 있다[2, 3].

오염퇴적물이 수질 및 수중생태계에 미치는 영향으로는 첫째, 퇴적물에 포함된 유기물은 수중산소를 분해하며 지속적인 산소가 공급되지 않을 경우 산소고갈로 이어져 저서생물에 영향을 미친다. 둘째, 침전된 유기물이 분해되는 과정에서 인, 질소 등의 영양염류가 다시 용출되어 수중에 방출된다. 이러한 수중 영양염류의 증가는 호소 및 하천의 부영양화의 내적요인으로 작용하며 수질관리에 어려움을 초래하게 한다. 셋째, 퇴적물에 포함된 DDT, PCBs, 다이옥신 및 중금속 등과 같은 독성물질은 수층으로 방출되거나 저서생물에 축적된다. 그런데 저서생물에 축적된 독성물질은 먹이사슬을 통해 다시 다음 단계로 소비자에게 전달되며 생물농축을 일으키게 된다. 이러한 저질오염의 원인물질로는 유기물질과 무기물질로 구분할 수 있으며, 유기물질은 대부분 자체적인 희석, 확산 및 분해작용에 의하여 제거될 수 있으나 중금속 같은 무기물질에 의한 오염은 자연에 의한 자정작용을 거의 기대할 수 없을 뿐 아니라 축적된 중금속을 선택적으로 제거하기란 거의 불가능하다. 중금속은 인체 및 생태계에 유해성을 갖고 있다는 점에서 그 중요성이 날로 증가하고 있다[4]. 그러나 현재까지 우리나라에서는 하천저질의 오염도에 관한 자료가 미흡한 실정이며, 일부 조사된 자료도 조사항목, 조사시기, 분석방법 등이 달라 상호 비교가 곤란한 점등이 있다.

한편, 일천팔백만 수도권 주민의 상수원 및 공업용수로 사용되는 한강의 수질은 관심의 초점이 되어 왔으며 최근에는 하류지역에서 저질오염에 기인하는 문제가 발생하여 광범위한 연구가 진행되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 한강에 유입하는 주요지천을 대상으로 하상저질을 채취하여 중금속 함량을 계절별, 입경별로 분석하고 분석된 자료를 통계 처리하여 오염물질중 일부 유해중금속의 거동을 파악하고 pH의 변화에 따른 하상 저질에서의 중금속 용출량을 파악하고자 하였다.

Ⅱ. 실험재료 및 방법

1. 조사지역 및 시료채취

한강유입 주요지천의 현황을 조사하고자 팔당하류 수계를 기준으로 하여 왕숙천, 탄천, 중랑천 및 안양천을 대상으로 시료를 채취하였다. 채취지점은 각 지천에서 한강본류와 합류하는 합류점을 기준으로 상류로 올라가면서 거리 별로 3등분하여 한 지천별로 3곳에서 저질시료를 채취하였다. 한편, 한강본류는 조사대상 4개 지천과 한강본류가 합류하는 지점을 선정하여 조사대상으로 하였고 시료채취 지점은 다음 그림 1과 같다. 시료채취는 계절별 오염도 차이를 살펴보기 위해 여름, 가을, 봄의 3차에 거쳐 채취하였다. 하천에서의 저질은 강우에 의한 유속에 따라 하천의 중앙부에서 연안부로 이동되므로[5, 6]. 연안부에서 dredger를 이용하여 채취하였다. Schroepher[7]의 연구에 의하면 하상에 퇴적되어 있는 오염물질 함량은 저질중에서 깊이 5 cm 이내가 가장 높은 것으로 보고한 바 있다. 시료로 사용한 저질은 표층토(약 5 cm 이내)를 채취하였고, 같은 지점의 농도 차이를 감안하여 반경 30 cm 간격으로 3곳을 채취하여 혼합시료로 하였다.

2. 분석방법

채취한 시료중 이물질을 제거하고 직사광선을 피하여 바람이 잘 통하는 서늘한 장소에서 자연건조시키고 hand grinder를 이용하여 분쇄한 후

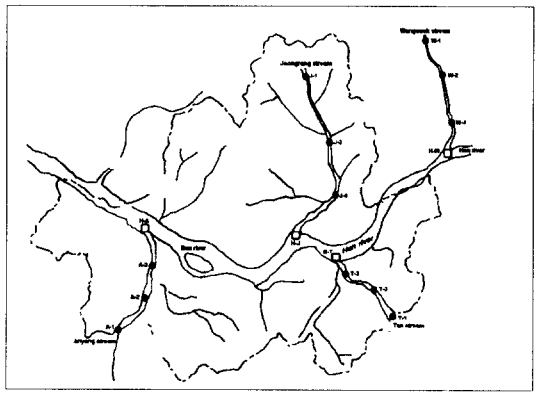

Figure 1. Sampling sites for determination of heavy metal concentration.

잘 혼합하였다. 분쇄한 저질을 입경별 농도차이를 살펴보기 위하여 체분석기를 사용하여 clay & silt(62 ㎛이하), very fine sand(63-125 ㎛), fine sand(126-250 ㎛)로[7] 분리한 후 수은 증발을 막기 위하여 2단계 금아말감으로 수은을 포집하여 원자상태의 수은을 냉원자흡광법(cold vapor method)으로 검출하는 수은분석 전용장치로 분석하였다. 외부 기인성 오염의 지표로 알려진 clay & silt(62 ㎛이하)를 취하여 중금속을 용출시켜 원자흡광광도계로 분석하였다[8]. 수은분석은 수은분석용 원자흡광광도계를 이용하였고 카드뮴, 구리, 납, 망간, 아연은 원자흡광광도계를 이용하였다. 수은 측정에 사용한 수은 분석첨가제 무수탄산나트륨, 수산화칼슘, 수산화알루미늄 등은 약 800℃ 회화로에서 약 2시간 건조하여 시약중에 함유 될 수 있는 수은을 제거하였다. 나머지 중금속의 산분해를 위한 염산, 질산은 유해물질 측정용을 사용하였다. 표준용액은 원자흡광분석용 1,000 mg/L를 증류수로 희석하여 사용하였고, 수은은 표준용액 1,000 mg/L를 증류수와 L-cystein 용액으로 희석하여 사용하였다.

Ⅲ. 실험 결과 및 고찰

1. 하상 저질 특성

1.1 유기물 분포

한강본류에 유입하는 4개 주요지천의 하상저질에 존재하는 유기물분포특성을 알아보기 위하여 강열감량(ignition loss)을 측정한 결과는 표 1과 같다. 4개지천의 저질 중 유기물질함량은 Table 2.에서와 같이 왕숙천 8.7~12.9%, 탄천 7.3~12.3%, 중랑천 7.5~12.9%, 안양천 7.9~13.7%로 나타났으며, 유입지천별로 커다란 차이를 나타내고 있지 않다. 아울러 계절별 강열감량의 변화 역시 뚜렷한 변화가 없는 것으로 나타났다. 이는 각 지천에 유입되어 하상저질에 축적되는 유기물이 생물학적인 작용에 의하여 어느 정도 분해가 이루어지고 있는 것에 기인하는 것으로 판단된다. 한편, 주요지천의 강열감량은 팔당호내 강열감량 1.2~6%[9]에 비하면 매우 높은 것으로 지속적으로 높은 부하의 유기물질이 지천에 투입되고 있으며, 아울러 한강수계에도 상당량의 유기물이 유입되고 있음을 간접적으로 증명하는 것이다.

Table 1. Seasonal contents of ignition loss in silt & clay(≤62㎛) sediment in tributaries [unit : %, Mean±standard deviation]

Sites		Season		
		Spring	Summer	Fall
Wangsook	W1	8.8±0.8	10.4±1.1	9.6±1.1
	W2	12.0±1.2	11.0±0.9	9.6±1.0
	W3	12.9±2.1	8.7±1.4	10.5±0.8
Tan	T1	9.6±1.1	8.6±1.1	7.3±1.2
	T2	10.5±0.8	9.3±2.2	8.9±1.5
	T3	12.3±0.6	11.4±2.1	11.0±2.1
Joongrang	J1	9.8±1.1	7.5±0.9	8.9±1.2
	J2	11.4±1.9	7.7±0.8	10.8±2.1
	J3	11.8±2.2	8.0±1.1	12.9±1.1
Anyang	A1	12.2±1.9	9.0±1.1	12.3±1.5
	A2	12.8±2.5	9.4±1.4	13.7±1.3
	A3	11.3±1.2	7.9±1.9	11.0±1.4

1.2 중금속 분포 특성

한강유입 지천인 왕숙천, 탄천, 중랑천 및 안양천의 각 지천별 평균 중금속 농도 및 지천과 한강본류의 합류역에서의 중금속 조사결과는 각각 그림 2 및 그림 3과 같다. 수은의 경우 왕숙천 0.078~0.194

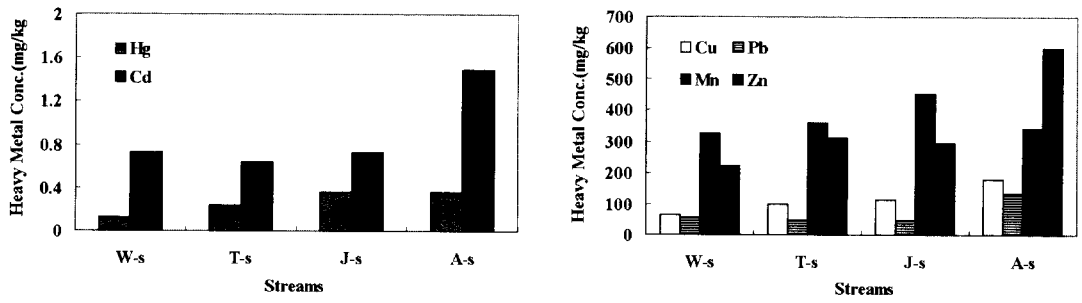

Figure 2. Heavy metal concentration in bottom sediments of tributaries of the Han river.

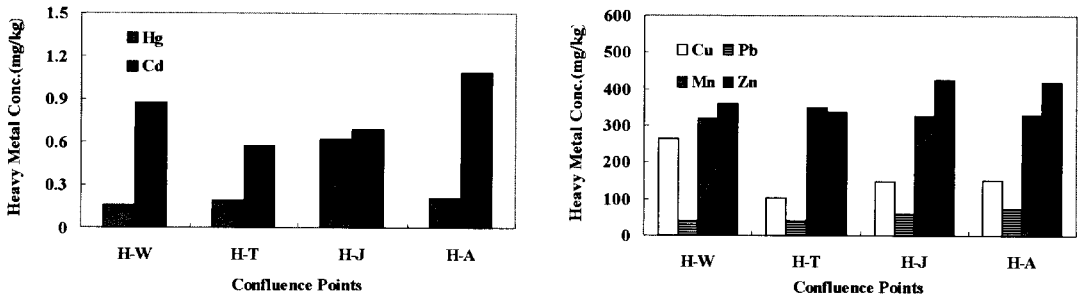

Figure. 3. Heavy metal concentration in bottom sediments of confluence between tributaries and Han river.

㎎/㎏, 탄천 0.102~0.425 ㎎/㎏, 중랑천 0.164~0.730 ㎎/㎏ 및 안양천 0.21~0.523 ㎎/㎏으로 하류 수역 일수록 높아지는 경향이 있었다. 그 농도가 가장 큰 안양천은 구로공단에서 방류되는 폐수에 기인된 것으로 추측된다. 합류지점의 저질중 카드뮴농도는 H-W에서 0.853~0.902 ㎎/㎏, H-T 0.427~0.661 ㎎/㎏, H-J 0.597~0.774 ㎎/㎏, H-A 0.908~1.402 ㎎/㎏으로 안양천 합류지점이 다른 지점보다 비교적 높았고, 이것은 지천의 중금속농도가 높기 때문이다. 지천의 경우 왕숙천 0.274~1.312㎎/㎏, 탄천 0.421~0.854 ㎎/㎏, 중랑천 0.551~0.982 ㎎/㎏ 및 안양천 1.085~2.040 ㎎/㎏ 이었으며, 안양천의 카드뮴농도가 다른 지천보다 비교적 높은 편이지만 특히 구로공단 부근인 A-B지점에서 1.622~2.040 ㎎/㎏으로 높게 검출되었다.

구리의 경우, 한강본류와 왕숙천의 합류지점은 255.2~270.6 ㎎/㎏으로 비교적 높게 검출되었다. 왕숙천의 경우 40.2~83.2 ㎎/㎏이며, 탄천 합류지점은 89.5~126.0 ㎎/㎏, 중랑천 합류지점 121.2~173.1 ㎎/㎏ 및 안양천 합류지점 111.3~170.7 ㎎/㎏으로 수은이나 카드뮴에 비하여 높게 나타나고 있는데 이는 구리의 경우 자연계내에 상당량 존재하고 있으며 이용범위가 넓기 때문에 상대적으로 하천에 방류되는 양도 많기 때문으로 사료된다. 지천별로는 탄천 55.2~179.5 ㎎/㎏, 중랑천 45.2~195.1 ㎎/㎏으로 하류로 갈수록 점차 높았고 안양천은 112.5~213.7 ㎎/㎏으로 다른 지천보다 비교적 높았다.

납은 각 합류지점에서 왕숙천 35.2~50.1 ㎎/㎏, 탄천 30.5~52.5 ㎎/㎏, 중랑천 41.8~80.5 ㎎/㎏ 및 안양천 58.7~90.4 ㎎/㎏이었다. 가장 높은 농도는 안양천 합류지점 가을시료에서 90.4 ㎎/㎏이었으며, 가장 낮은 농도는 탄천 합류지점에서 30.5 ㎎/㎏이었다. 낮은 농도는 자연토양에 함유된 40~50 ㎎/㎏농도보다 낮았다. 지천별 농도는 왕숙천 20.6~90.8 ㎎/㎏, 탄천 38.3~62.1 ㎎/㎏, 중랑천 31.2~72.5 ㎎/㎏ 및 안양천 69.7~188.1 ㎎/㎏이었다. 망간의 경우 본류와 지천의 합류지점 농도는 왕숙천 250.2~390.4 ㎎/㎏, 탄천 311.1~385.7 ㎎/㎏, 중

Table 2. Seasonal variation of heavy metal concentration in bottom sediments of tributaries and confluence of Han river [unit ; mg/kg dry weight base, Mean±standard deviation]

Heavy Metal	Season	Tributary Stream*				Confluence Points**			
		W	T	J	A	H-W	H-T	H-J	H-A
Hg	Spring	0.145±0.01	0.291±0.05	0.475±0.01	0.435±0.01	0.187±0.02	0.174±0.01	0.536±0.02	0.209±0.01
	Summer	0.105±0.01	0.245±0.05	0.371±0.01	0.308±0.01	0.14±0.02	0.204±0.01	0.604±0.01	0.152±0.01
	Fall	0.124±0.02	0.192±0.06	0.249±0.01	0.341±0.02	0.15±0.01	0.194±0.01	0.713±0.01	0.255±0.01
Cd	Spring	0.781±0.02	0.654±0.02	0.667±0.02	1.77±0.01	0.902±0.01	0.427±0.01	0.597±0.01	0.908±0.02
	Summer	0.649±0.03	0.592±0.01	0.72±0.02	1.36±0.01	0.872±0.01	0.633±0.02	0.774±0.01	0.956±0.01
	Fall	0.73±0.02	0.639±0.02	0.771±0.03	1.35±0.01	0.853±0.01	0.661±0.01	0.695±0.01	1.40±0.01
Cu	Spring	72.8±9.3	123.4±4.5	129.6±3.2	204.5±5.8	270.6±3.8	126.0±2.1	145.8±3.1	170.7±4.2
	Summer	52.7±7.6	83.0±3.9	79.7±1.2	145.4±4.3	261.5±3.4	92.7±3.1	121.2±3.2	111.3±2.1
	Fall	67.3±5.4	90.9±4.8	122.8±3.9	184.6±6.6	255.2±4.5	89.5±2.2	173.1±4.3	168.1±2.3
Pb	Spring	40.9±5.3	42.4±3.3	45.7±3.8	152.6±3.7	40.4±2.1	30.5±4.9	50.4±3.3	70.1±3.2
	Summer	54.6±6.2	44.9±4.1	42.9±3.1	83.7±4.1	35.2±2.2	41.3±1.2	41.8±3.6	58.7±2.9
	Fall	70.1±3.7	48.8±5.1	61.6±3.7	160.0±3.7	50.1±3.1	52.5±1.9	80.5±4.2	90.4±4.1
Mn	Spring	339.9±10.2	354.4±8.2	459.9±4.1	381.7±10.0	390.4±3.9	385.7±4.2	355.2±5.1	355.3±2.7
	Summer	313.3±9.7	371.9±4.9	371.3±7.1	347.9±3.9	250.2±4.2	311.1±2.8	298.7±6.2	330.8±4.2
	Fall	321.5±8.8	344.7±5.7	533.2±3.5	296.6±4.8	315.7±3.8	350.4±3.1	320.1±3.7	300.3±7.7
Zn	Spring	222.7±7.7	339.5±9.2	302.2±8.8	639.7±5.4	397.8±7.7	341.4±2.1	455.3±4.1	400.5±5.8
	Summer	197.7±5.7	265.5±8.3	221.2±4.5	635.6±5.5	311.5±9.3	298.6±5.5	327.0±3.7	316.0±47
	Fall	242.0±4.5	327.2±7.0	362.3±5.5	528.6±6.5	370.8±7.8	371.5±5.1	494.5±4.8	530.4±3.9

* W, T, J and A mean Wangsook, Tan, Joongrang and Anyang stream, respectively.

** H-W, H-T, H-J and H-A mean confluence points between han river and tributary streams located in the mainstream of Han river

랑천 298.7~355.2 ㎎/㎏ 및 안양천 300.3~355.3 ㎎/㎏ 범위로 검출되었다. 지천별 농도는 왕숙천 287.0~411.2 ㎎/㎏, 탄천 298.0~415.6 ㎎/㎏, 중랑천 332.0~842.5 ㎎/㎏, 안양천 280.5~403.8 ㎎/㎏으로 검출되었다. 아연의 분석결과, 합류지점의 농도는 왕숙천 311.5~397.8 ㎎/㎏, 탄천 298.6~371.5 ㎎/㎏, 중랑천 327.0~494.5 ㎎/㎏ 및 안양천 316.0~530.4 ㎎/㎏로서 하류지역인 안양천 합류지점이 약간 높았다. 지천별 농도는 왕숙천 150.2~340.1 ㎎/㎏, 탄천 205.6~455.1 ㎎/㎏, 중랑천 163.1~510.6 ㎎/㎏ 및 안양천 534.7~1774.8 ㎎/㎏이었으며 안양천 안양교(A-2) 봄 시료에서 818.0 ㎎/㎏은 높은 농도였다. 이러한 현상은 주변 공단지역의 도금공장이나 아연다량 사용업소의 폐수처리가 적절히 처리되지 않은 원인으로 사료된다.

한편, 저질의 강수량 등 계절적 특성이 저질변화에 미치는 영향을 알아보기 위하여 계절별로 저질을 분석한 결과는 표 2와 같다. 전체적으로 지천의 중금속농도와 합류역과 거의 경향을 보이고 있으며, 합류역이 더 높지 않은 이유는 상대적으로 한강본류의 하상유속이 크고 및 유량의 많았기 때문이라고 판단된다.

합류역의 저질중 수은농도는 봄 0.174~0.536 ㎎/㎏, 여름 0.140~0.604 ㎎/㎏, 가을 0.150~0.713 ㎎/㎏이 각각 검출되었다. 이들 중 중랑천 합류지점인 H-J에서 0.536~0.713 ㎎/㎏으로 가장 높았다. 그 원인은 산업폐수의 유입으로 추측된다. 그러나 계절별 농도차이는 통계적으로 유의한 차이가 없었다. 카드뮴의 경우 왕숙천 및 탄천의 여름시료는 농도가 낮았지만 중랑천 및 안양천은 비교적 높았

다. 이러한 현상은 배출업소 조업기간과 작업량에 따른 차이로 추측된다. 이 등이 왕숙천을 대상으로 조사한 결과에 의하면 1.094~4.988 ㎎/㎏으로 높게 나타났으나[10], 본 연구에서는 0.424~1.102 ㎎/㎏으로 비교적 낮았다. 이는 조사시기, 조사지점 및 실험방법 등의 차이에 기인한다. 망간의 경우 계절별 농도는 왕숙천에서 봄에 평균 339.9 ㎎/㎏, 탄천은 여름에 371.9 ㎎/㎏, 중랑천은 봄에 459.8 ㎎/㎏, 안양천은 봄에 381.7 ㎎/㎏으로 계절별로 높은 농도를 보였다. 그러나 조사된 농도는 모두가 Hideo 등[11] 이 보고한 일본하천 저질중의 망간함량인 23~861 ㎎/㎏과 비교하면 대체로 같은 범위에 속하였고 갈수기인 봄과 수량이 안정적인 가을에 비해 풍수기인 여름의 농도가 낮은 경향을 보였다. 한편, 아연의 경우 일본 풍평천에서 946~2248 ㎎/㎏이 검출된 것에 비하면 중랑천(W-J)지역을 제외하고는 낮은 농도이었다[11].

1.3 입경별 특성

저질의 중금속 함량에 영향을 미치는 인자는 저질의 입경, 저질중의 유기물질량, 계절별 저질 이동, 지질학적 특성 등으로 알려지고 있는데 본 연구에서는 입경별로 수은농도분포를 파악하였으며, 그 결과는 그림 4와 같다. 각 지천별로 채취된 시료를 입경별로 silt & clay, very fine sand, fine sand로 나누어 수은농도를 살펴본 결과, 그림 4에서 보듯이 입자의 크기가 작을수록 수은농도가 높게 나타나고 있다. 이는 Gonsiorczyk등[12]이 보고한 바와 같이 저질 입자가 작을수록 표면적이 커 비교적 높은 농도의 금속을 함유한다고 하여 저질 입경이 큰 입자의 중금속 함량을 배경기준치라고 가정하고 Clay & Silt 입자중 중금속의 농도를 오염비로 설정하여 외부기인성 중금속 오염도를 평가하는 것과 일치하는 것이다. 아울러 팔당호[9]의 입도별 분포특성과 비교해 볼 때 농도는 다르나 입경이 작아질수록 입자중에 흡착될 수 있는 중금속의 양이 많게 되어 입도가 작아지면 오염도가 증가한다고 보고한 결과와도 일치하고 있다.

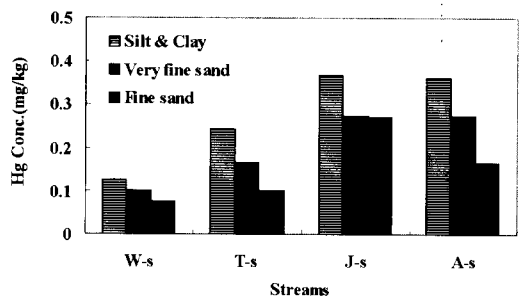

Figure 4. Mercury concentration distribution according to depth of bottom sediments.

1.4 중금속간 상관성

대상지역의 오염특성을 파악하고자 각 중금속간 상관성을 알아보았으며, 그 결과는 표 3과 같다. 조사지역시료에서 중금속간 상관성은 구리-납, 구리-아연 및 구리-수은은 매우 유의한 ($p<0.01$)한 상관성을 나타내 일단 본 조사지점의 저질에서 구리가 검출되면 다른 중금속, 특히 납, 아연 및 수은의 존재 가능성은 매우 큰 것으로 나타났다. 아

Table 3. Correlation matrix of heavy metal concentrations of the bottom sediment by tributaries and confluence of Han river

	Hg	Cd	Zn	Mn	Pb	Cu
Hg	1.00000					
Cd	0.19641	1.00000				
Zn	0.25307	0.75827	1.00000			
Mn	0.00222	-0.06889	-0.02924	1.00000		
Pb	0.14125	0.74136	0.70369	-0.01239	1.00000	
Cu	0.71847*	0.64266	0.64266	-0.7670	0.66997	1.00000

울러 납-아연, 납-카드뮴 및 아연-카드뮴도 표 4에서 보듯이 유의한 상관성($p<0.01$)을 나타내었다. 한편, 한강과 각 지천이 만나는 한강본류에서는 아연-납은 매우 유의한 관계($p<0.01$)를 보였으며, 중랑천의 경우 아연-구리, 아연-납, 아연-카드뮴 및 아연-수은에서 매우 유의한 상관성($p<0.01$)을 나타내고 있었다. 왕숙천의 경우 카드뮴-망간, 카드뮴-아연, 카드뮴-수은 및 아연-수은에서 매우 높은 상관성($p<0.01$)을 나타내고 있다. 이상의 결과로 볼 때 한강 유입지천별로 중금속의 발생량 및 발생원이 다르기 때문에 중금속간 상관성도 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다. 계절별로 중금속간의 상관관계를 알아본 결과, 거의 모든 항목에서 유의한 차이를 나타내고 있지 않았으며, 따라서 계절적인 영향에 의한 중금속의 상호연관성은 없는 것으로 판단된다.

1.5 중금속과 강열감량의 관계

저질에서의 중금속농도는 유기물질량에 따라 달라져 유기물질이 풍부할 수록 미세한 유기물 표면에 금속이 흡착하므로 금속 방출량이 낮아져 저질중 금속함량이 높다고 보고되고 있으며[12], 중금속 대부분이 유기물 양과 양의 상관관계를 갖는다고 하였다. 그림 5는 한강유입 지천 및 지천과 한강본류와의 합류점에서 측정된 중금속농도와 강열감량과의 상관관계를 나타낸다. 그림 5에서 보듯이 강열감량(유기물)과 중금속농도는 모두 양의 상관성을 지니고 있으며 특히 구리와 강열감량과는 매우 높은 상관성을 지니고 있었다. 수은농도와 유기물질량과의 상관성은 $r=0.6541$($p<0.01$)로 매우 유의한 상관성이 있는 것으로 나타나, 유기물질량이 많을수록 수은농도가 높다는 사실을 알 수 있었다. 이는 Malm 등[2]이 저질에 유기물의 양이 많을수록 수은의 메틸화(Methylation)가 활발하며 유기물이

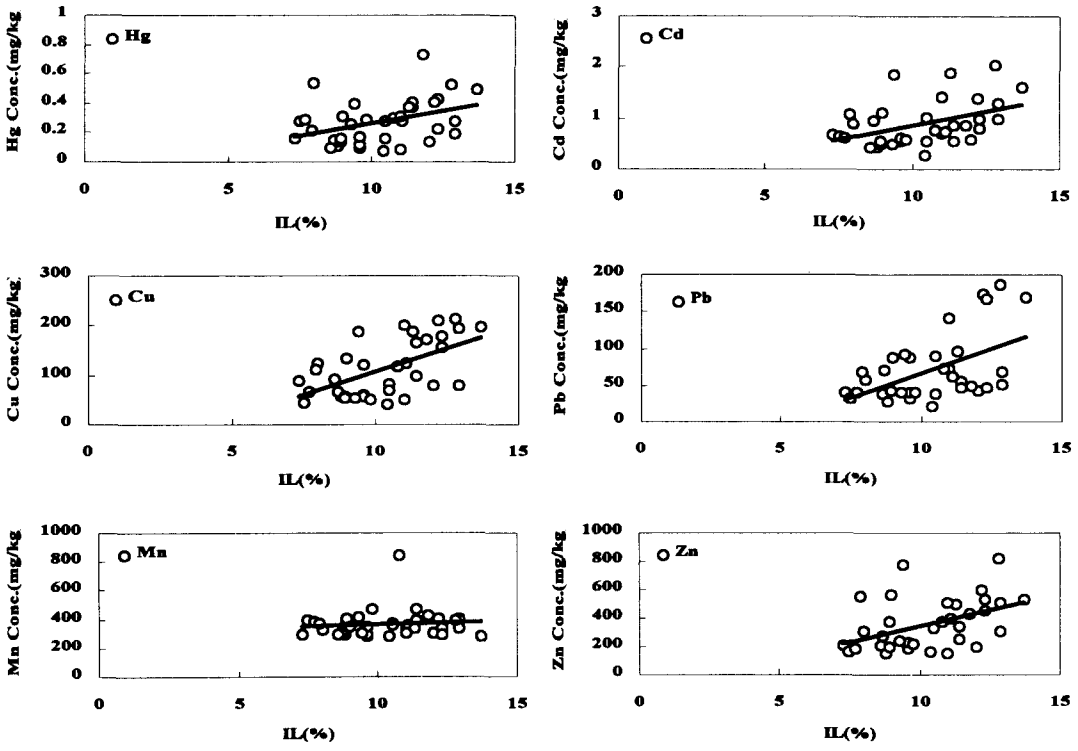

Figure 5. Results from regression analysis between ignition loss and heavy metals in bottom sediments of tributaries and Han river.

수은흡착을 증가시킨다고 보고한 결과와 일치한다. 한편, 계절별로 상관성을 알아본 결과 여름에는 상관성을 나타내지 않았는데, 이는 풍수기 강우에 의한 유량증가로 유기물의 상당 부분이 씻겨 내려갔기 때문이며 계절별 저질 이동은 홍수기간 동안 현저하다. 이동 기전은 수리학적, 지형학적 관계가 깊다고 보고한 Gonsiorczyk 등[12]의 결과와 비슷한 경향을 나타내었다.

2. 저질의 용출특성

저질의 pH별 용출 특성을 파악하기 위하여 시료중 오염농도가 가장 높은 안양천 중류 지역의 봄 시료를 표본 시료로 하여 염산 및 수산화나트륨을 이용하여 용매를 pH 2, 4, 6, 8, 10으로 조정한 후 폐기물공정시험방법에 의해 용출하였다. 수은은 10㎎/㎏ 이상을 함유한 시료에서 용출이 가능하므로 용출실험에서 제외하였다. 용출실험 결과는 표 4와 같다. 용출후의 pH 값은 3.4, 6.0, 6.3, 6.3, 6.5 로서 저질에서의 pH 6.5~7.5와 상호 중화작용으로 인하여 용출액의 pH가 중성 쪽으로 진행된 것으로 보인다. pH별 용출특성은 pH 2인 강산성에서 모든 중금속이 용출되었으며 용출량과 용출농도도 가장 높은 경향을 보였다. 구리는 모든 pH 용매에서 용출되었으며 pH 6.0에서 0.080%의 용출율을 보인 것은 박 등이 제철제강업소 분진 용출실험에서 용출률 0.096% 보인 것과 비슷하였다. 특히 납은 강산과 강알칼리에서만 용출되었다. 용출률이 가장 높은 금속은 카드뮴으로서 pH 2에서 15.5%이었다. Maruyama 등[13]에 의하면 pH에 따른 여러 가지 중금속의 용해도는 pH가 증가하면 불용성의 금속 수산화물을 형성하여 잘 용해되지 않음을 지적한바 있으며 Pattersone 등[14]은 대부분의 금속은 OH^- 및 기타 이온들과 착체를 형성하고 있으며 이론적인 용해도는 pH의 복합 함수관계에 있다고 하였다. 본 연구 결과로부터 저질에서의 중금속 용출은 중성부근에서 거의 용출이 되지 않음을 알 수 있었다.

Ⅳ. 결 론

한강본류 및 주요지천의 하상저질중에 존재하는 중금속 분포를 파악하기 위하여 여름, 가을 및 봄 3차에 걸쳐서 수은, 카드뮴, 구리, 아연, 납, 망간의 중금속분포 및 용출율을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 한강본류에 유입하는 지천 중 안양천이 가장 높은 중금속 농도를 나타내고 있으며, 지천의 중

Table 4. Leaching fraction and heavy metal concentration from the sediments according to pH variations(unit : ㎎/㎏, %)

pH		Leaching rate and concentration	Heavy metal concentration				
P-1	P-2		Cu	Pb	Mn	Zn	Cd
2.0	3.4	용 출 량	2.632	0.013	3.978	0.850	0.471
		용 출 율	1.232	0.007	0.993	0.104	15.50
4.0	6.0	용 출 량	0.164	--	0.633	0.319	--
		용 출 율	1.077		0.158	0.039	
6.0	6.3	용 출 량	0.171	--	0.717	0.449	--
		용 출 율	0.080		0.179	0.055	
8.0	6.3	용 출 량	0.166	--	0.748	0.482	--
		용 출 율	0.077		0.187	0.059	
10.0	6.5	용 출 량	0.113	0.616	0.508	0.302	--
		용 출 율	0.052	0.328	0.127	0.037	
Heavy metal concentration in the sediments			213.7	188.1	400.7	818.0	3.04

P-1 : the pH of leachated solution after the first leaching test
P-2 : the pH of leachated solution after the second leaching test

금속농도는 지천유역내 발생원 특성에 따라 달랐다. 저질중 silt & clay 입자를 선별하여 수은외 5가지 중금속을 측정한 결과 카드뮴, 아연 및 납은 안양천 구로공단(A-2)부근이, 구리는 왕숙천 합류지점(H-W), 망간은 중랑천 우면교(J-2)부근이 높게 검출되었다.

2. 수은 함량은 저질 입경별로 clay & silt (≤62 ㎛), very fine sand(63~125 ㎛), fine sand(126~250 ㎛)로 구분하여 측정한 결과 입경이 작을수록 수은 농도가 높게 검출되었다. 유기물질량과 수은농도와의 상관성은 매우 유의한 상관관계($p<0.01$)를 나타내 유기물질량이 높을수록 수은 흡착이 높다는 것을 알 수 있었다.
3. 계절별 중금속 농도는 대체로 강수기인 여름에 낮았고 봄보다는 가을이 낮은 경향을 나타내었다. 그러나 탄천의 경우에는 수은, 카드뮴, 망간의 농도가 여름보다 가을에 더 낮게 나타났으며, 계절적 변화에 상관없이 하류로 갈수록 중금속농도는 증가하는 경향을 보였다.
4. 중금속간 상관성은 구리-납, 구리-아연 및 구리-수은은 매우 유의한 ($p<0.01$)한 상관성을 나타났다. 납-아연, 납-카드뮴 및 아연-카드뮴 역시 유의한 상관성($p<0.01$)을 나타내었으며, 한강본류와 각 지천이 만나는 합류역에서 아연-납은 매우 유의한 관계($p<0.01$)를 보였다. 한편, 중금속과 강열감량은 모두 양의 상관성을 가졌으며, 구리의 경우가 가장 높은 상관성($p<0.01$)을 나타내었다.
5. 저질내 중금속 용출특성은 수은을 제외한 5가지 중금속에서 pH 2일 때 용출률이 0.007~15.50%로 가장 높았고 pH 4~10의 범위에서는 용출률이 1%이하였다.

참 고 문 헌

1. Harremoes, P. : The challenge of managing water and material balances in relation to eutrophication, Water Science & Technology. 37, 3, 9-18, 1998.
2. Malm, O., Pfeiffer, W.C., Fiszman, M., and Azcue, M.P. : Heavy metal concentration and availability in the bottom sediments of the Parabia do Sul-guanda river system. Environmental Technology Letters. 10,675-680, 1989.
3. 국립환경연구원, 일본국제협력사업단 : 하천, 호소의 수질보전과 유역관리에 관한 한일 공동세미나, 환경부, 13-27, 1997.
4. 김동민, 김수생 : 환경과학개론, 한서출판사, 253-255, 1984.
5. Taki, K., and Fukushima, T. : 底質テタやスと底質汚染の評價, 水環境學會紙. 6, 85-90, 1993.
6. Paul, L., Scruter, K., and Labahn, J. : Phosphorus elimination by longitudinal subdivision of reservoirs and lakes, Water Science & Technology. 37, 2, 235-244, 1998.
7. Schroepher, L. : Handbook of limnology. Lewis Publisher, 235-269, 1987.
8. 高橋 明 : 水質汚濁 調査方法, 水利科學研究所編, 地人書館. 155-190, 1973.
9. 환경처 : 팔당호 시험준설 영향조사, 환경처, 36-38, 1990.
10. 이상기 : ICP분석에 의한 하천수 저니토중 중금속 함량 측정, 성균관대학교 대학원 석사학위논문, 1986.
11. Hideo, N., Fumi, T., and Suzuki, S. : Distribution of Al, Fe, and Mn in the bottom mud of 91 Japanese river, Japan Journal of Limnology, 46, 107-114, 1985.
12. Gonsiorczyk, T., Casper, P., and Koschel, R. : Phosphorus-binding forms in the sediment of an oligotrophic and an eutrophic hardwater lake of the Baltic lake district(Germany), Water Science & Technology. 37, 3, 51-58, 1998.
13. Maruyama, T., Hannah, S.A., and Chen, J.M. : Metal removal by physical and chemical treatment processes, Journal of Water Pollution Control Federation, 47, 5, 45-53, 1975.
14. Patterson, J.W., and Minear, R.A. : Physical-chemical methods of heavy metals removals, Pergamon Press, 1985.