

## 저수위시 노출된 저수지 저니 상의 식생과 구리(Cu)의 흡수

이충우 · 차영일

경희대학교 자연과학대학 환경학과  
(1993년 3월 16일 접수)

### Absorption of Copper(Cu) by Vegetation on Reservoir Sediment Exposed after Drawdown

Choong-Woo Lee and Young-II Cha

Department of Environmental Sciences, College of Natural Sciences,  
Kyung Hee University

(Manuscript received 16 March 1993)

#### Abstract

Shingal reservoir is a relatively small (211ha) and shallow impoundment, and approximately 25 ha of its sediment is exposed after spring drawdown. At least 14 vascular plant species germinate on the exposed sediment, but *Persicaria vulgaris* Webb et Moq. quickly dominates the vegetation. In order to estimate the role of the vegetation in the dynamics of heavy metal pollutants in the reservoir, Cu concentration of water, fallout particles, exposed sediment, and tissues of *P. vulgaris*, was analyzed.

Cu content in reservoir water decreased from 13.10mg/m<sup>2</sup> on May 15 (before drawdown) to 3.08mg/m<sup>2</sup> in June 1 (after drawdown), mainly due to the lowering of water level. Average atmospheric deposition of Cu by fallout particles was 10.84  $\mu$ g/m<sup>2</sup>/day. Cu content in the surface 15cm of exposed sediment decreased from 5.094g/m<sup>2</sup> right after drawdown, to 0.530g/m<sup>2</sup> in 41 days, which is a 89.6% decrease. Therefore up to 99.7% of Cu in the reservoir appears to exist in the sediment, only 0.3% in water.

If the rate of atmospheric input by fallout particles is assumed to have been the same since 1958, when the reservoir was completed, cumulative input of Cu during the 38 years would have been 150.35mg/m<sup>2</sup>, which is only 3.0% of Cu content in sediment right after drawdown. Therefore, most of Cu in the Shingal reservoir must have been transported by the Shingal-chun flowing into the reservoir.

Standing crop of vegetation on the exposed sediment 41 days after drawdown was 730.67g/m<sup>2</sup>, of which 630.91g/m<sup>2</sup> was *P. vulgaris* alone, and Cu content in *P. vulgaris* at this time was 6.612mg/m<sup>2</sup>. This was only 0.13% of Cu in the exposed sediment, but was 50.5% of Cu in water before drawdown, or 167% of the average annual input of Cu by atmospheric deposition. If other plants were assumed to absorb Cu to the same concentration as *P. vulgaris*, total amount of Cu absorbed in 41 days by vegetation on the exposed sediment is estimated to be 1913.3 g, which is a considerable contribution to the purification of the reservoir water.

Key Words : Copper, Absorption, Reservoir, Water, Fallout particles, Vegetation, Exposed sediment, Pollution, Deposition.

## 1. 서 론

환경오염물질이 저수지나 호수 등으로 유입되는 경로는 주로 유입수와 대기로부터의 강하분진이며 (Lisk, 1972), 이들 물질은 유입 후 많은 양이 저니로 퇴적, 침전, 또는 흡착된다. 환경오염물질 중 중금속류는 미량일지라도 수중생물과 저니 등에 축적되면 먹이연쇄에 의해 농축되어 어류, 조류 등 상위 소비자는 물론 최종 소비자인 인간에게까지 피해를 나타낸다(Foerstner and Wittmann, 1981). 중금속의 하나인 구리(Cu)는 동식물 조직에서 여러가지 효소의 구성요소로서 작용하며 그리고 철 대사와 골수의 세포 형성에 관여하는 필수 미량금속이나, 농도가 높을 경우 효소의 작용 및 동식물의 성장을 억제하고 (Larcher, 1983), 인체 조직에 과량 축적되면 용혈성 빈혈, 황달 및 간장과 신장의 퇴화를 가져오는 것으로 알려져 있다(정국삼, 1987).

수도권에 위치한 신갈저수지는 저수면적이 211 ha로서 그 물은 오산천으로 방류되어 농업용수로 사용되고, 수도권 낚시인구를 위한 유원지로도 이용되고 있다(용인군, 1990). 그러나 저수지 인근지역 및 저수지로 유입되는 신갈천 상류에 여러가지 산업시설이 존재하고, 저수지 동쪽으로 경부고속국도가 지나가는 등 많은 환경오염물질 배출원이 존재하고 있어 저수지로의 오염물질의 유입 및 저수지 내에서의 그 동태와 생물학적 농축에 관심을 갖게 하고 있다.

신갈저수지는 해마다 5월 중순 경부터 모내기를 위하여 집중적으로 물을 방류하며, 이 때 수심이 낮은 곳의 저니가 드러나게 된다. 그 후 노출된 저니에서는 하천에 의해 운반되어 온 것으로 보이는 각종 식물의 종자가 발아하여 7월 하순 무렵까지 매우 빠르게 성장하다가, 장마로 인해 수위가 높아지면 이 식물은 물에 잠겨 서서히 분해되기 시작한다. 노출된 저니 위에 발달하는 식생은 저니로부터 필수원소 뿐만 아니라 여러가지 오염물질을 흡수(김복영 외, 1982 ; 김재봉 외, 1980 ; 정완호와 이해풍, 1987 ; Lagerwerff and Specht, 1970 ; Pouyat and McDonnell, 1991; Steinnes and Andersson, 1991)하여 체내에 축적하였다가 식물체가 물에 잠겨 분해됨에 따라 이를 다시 물속으로 방출하게 된다. 따라서 노출된 저니 위에 발달하는 식생은 저수지나 호수 등으로 유입되는 오염물질의 동태에 영향을 미치게 된다.

본 연구에서는 신갈저수지에서의 Cu의 유입과 동태를 규명하려는 노력의 일환으로, 강하분진과 하천수에 의한 Cu의 유입량과 저니에의 축적량 등을 추정하였으며, 특히 저수위시 노출되는 저니에 어떠한 식물군락이 발달하고, 이러한 식물군락이 Cu의 동태에 있어 어떠한 역할을 하고 있는가를 밝히고자 하였다. 이는 신갈저수지 뿐만이 아니라 Cu에 의해 오염되고 있는 다른 호수나 저수지에서의 Cu의 동태를 이해하고, 이와 관련하여 식물의 역할을 판단하기 위한 중요한 참고자료가 될 것이며, 신갈저수지를 농업용수로 사용하고 있는 오산천 유역의 논 등 농경지 작물의 Cu 흡수, 축적과 관련하여 중요한 의미를 가지게 될 것이다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 조사지역

조사지역은 수위가 낮아질 경우 저니가 노출되는 신갈저수지 상류지역으로, 면적은 저수지 전체 면적의 약 1/10에 해당하는 20 ha이었다(Fig. 1a). 조사 식물의 종자가 발아하여 7월 하순 무렵까지 매우 빠르게 성장하다가, 장마로 인해 수위가 높아지면 이 식물들은 물에 잠겨 서서히 분해되기 시작한다. 노출년도인 1992년의 경우 신갈저수지의 수위는 5월 20일경부터 낮아지기 시작하여 6월 2일경에는 저니가 완전히 노출되었으며, 조사지역을 포함, 갈수기에 노출되는 저니의 총면적은 약 25 ha 였다.

노출된 저니는 초기에는 지반이 매우 약하여 접근이 어려웠으나 4~5 일 후에는 보행이 가능할 정도로 굳어졌다. 여기에 6월 초부터 여러 종의 유식물이 나타나기 시작하였으며, 이 식물들은 빠르게 성장하여 7월 초순경에는 거의 연속된 식피를 형성하였다.

### 2.2. 저수지 물 속의 Cu 함량

조사지역 내에서 8개 지점 (W1~W8, Fig. 1b)을 선정, 물의 방류가 시작되기 전인 5월 1일부터 시작하여 방류가 거의 완료된 6월 1일까지 15일 간격으로 저수지의 물을 3회 채수하여 Cu의 농도를 측정하였다. 6월 1일에는 조사지역 대부분이 노출되어, 가능한 지점에서만 채수를 하였다.

채수는 채수기를 이용하여 각 지점의 중간 깊이에

서 하였으며, 물 속의 Cu 농도는 환경오염공정시험법 수질편(환경처, 1992)에 따라 시료를  $\text{HNO}_3$ 로 전처리한 후 GFAAS (graphite furnace atomic absorption spectrometer, Varian SpectraAA-300)를 사용하여 측정하였다. 조사시기별 평균 Cu 농도의 차이는 분산분석으로 검정하였다.

### 2.3. 강하분진 중의 Cu 함량

신갈저수지 서쪽에 위치한 경희대학교 수원캠퍼스 내에 관리가 용이한 2개 지점(P1, P2)을 선정(Fig. 1a), 지상 3m 높이로 British standards deposit gauge를 변형한 강하분진 포집기를 설치하고 3월 26일부터 7월 24일까지 강하분진을 포집하였다. 포집병 용량은 3 l, 깔대기 직경은 24.5 cm이었으며, 강하분진의 1회 포집기간은 강우량에 따라 8일에서 19일까지로 조절하였다(Table 2).

일정기간 동안에 포집병에 포집된 분진은 진공펌

프를 이용, filtrating apparatus 로 pore size  $1.0 \mu\text{m}$ 의 membrane filter(Whatman, WCN Type)에 여과한 다음 환경오염공정시험법 대기편(환경처, 1992a)의 질산법에 따라 전처리한 후 그 시료의 Cu 농도를 GFAAS로 측정하였다. 또한 membrane filter를 통과한 여액은 Expapier NF-2 (Sumitomo Chemical, Japan)에 chelate시켜 Expapier operation manual (Anonymous, 1992)에 따라 XRF(Xray fluorescence spectrophotometer, Rigaku 3063, Japan)로 Cu 농도를 측정하였다(Anonymous, 1992). 이와 같이  $1.0 \mu\text{m}$ 를 기준으로 분리하여 측정된 두 결과를 합하여 일정기간 동안에 강하분진에 의해 유입된 Cu의 양( $\mu\text{g}/\text{m}^2$ )으로 하였다.

### 2.4. 노출된 저니 중의 Cu 함량

노출된 저니 중의 Cu 함량은 세개의  $10 \times 10 \text{ m}$  방형구내에서 조사하였다. 저수지로 유입되는 두 지

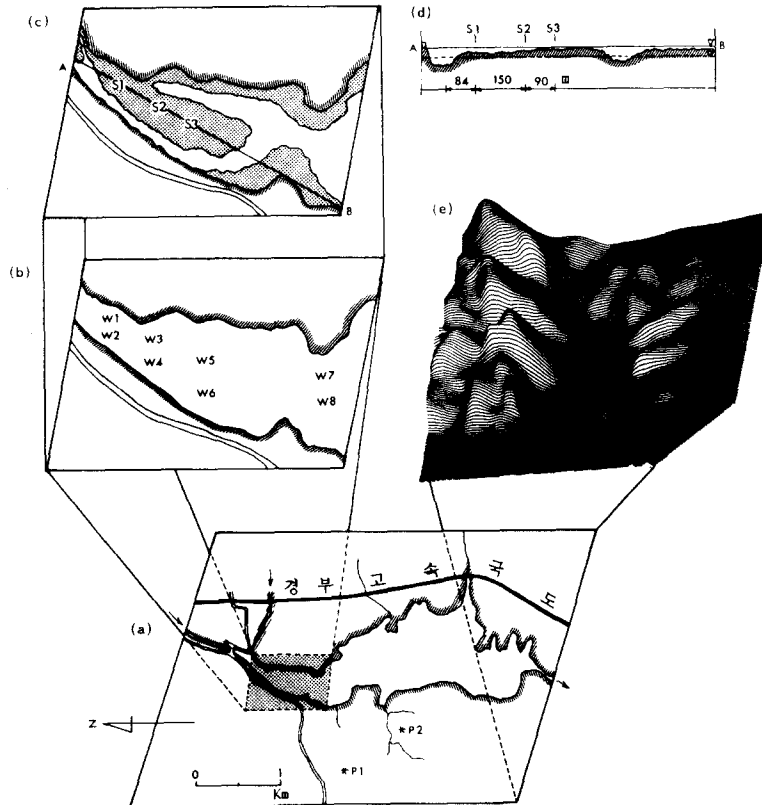


Fig. 1. Map of Shingal reservoir area, with location of sampling sites : (a) fallout particle sampling sites (P1 and P2), (b) reservoir water sampling sites (W1~W8), (c) exposed sediment and vegetation sampling sites after drawdown (S1~S3), (d) cross section of study area[A~B on (c)], (e) 3D map of the Shingal reservoir area.

천이 합류하는 지점으로부터 84m 거리에 S1, S1으로부터 150m 거리에 S2, 그리고 S2로부터 90m 거리에 S3 방형구를 설치(Fig. 1c)하고 6월 5일부터 10일 간격으로 7월 16일까지 5회 조사하였다. 각 방형구에는 0.25 × 0.25m의 소방형구 3 개를 무작위로 설치하고, 각 소방형구에서 core sampler (Ø 4.3 cm)를 사용하여 깊이 15 cm 이내의 저니를 2회 채취하여 혼합한 것을 표본으로 하였다.

채취한 저니는 약 48시간 냉장(4°C)보관 후 실온에서 건조하여 나무 roller를 사용, 분쇄한 후 비금속성의 100mesh 체에 통과된 것을 시료로 사용하여 Cu 함량을 측정하였다. 이 시료 5 g을 flask에 넣고 0.1N-HCl 50ml를 가하여 30°C의 수욕진탕기에서 1시간 동안 전처리한 후 여과지 (Toyo, 5B)로 여과한 용액을 측정용 시료로 하여 GFAAS를 사용하여 가용성 Cu의 농도 ( $\mu\text{g/g}$ )를 측정하였다. 또한 저니 단위면적당의 Cu 함량을 계산하기 위하여 한 방형구 내 세 소방형구의 저니표본 건중량 합계를 그 총용적 ( $435.7 \text{ cm}^3 \times 3$ )으로 나누어 각 방형구에서의 저니의 비중을 계산하였다.

## 2.5. 저니 상의 식물의 생체량 및 Cu 함량

노출된 저니 위의 식물이 어느 정도 성장한 후인 6월 25일부터 시작하여 저니표본 채취와 같은 시기에 3 회에 걸쳐 저니 위의 식물을 수확하였다. 매회 수확 때마다 저니표본 채취지점에 인접한 지점에 같은 크기의 소방형구를 설치하여 그 안의 모든 식물을 깊이 15cm 이내의 뿌리까지 채취하였다. 15cm이하에는 뿌리가 거의 존재하지 않았다. 채집한 식물은

뿌리에 붙은 토양입자를 세척하고 증류수로 수차례 (ND : not detected) 헹군 후 지상부(shoot)와 뿌리(root)로 나눈 다음 85°C에서 24시간 건조하여 0.1mg까지 무게를 달아 저니 단위면적당 건중량 ( $\text{g/m}^2$ )으로 표시하였다.

우점종인 봄여뀌(*Persicaria vulgaris* Webb et Moq.)는 지상부와 뿌리를 각각 분말로 만든 후 105°C에서 6시간 동안 재건조하고, 이 건조시료 0.5g을 flask에 정확히 취하여 hot plate 상에서 황산-질산-과염소산으로 전처리를 한 후 GFAAS로 Cu 농도를 측정하였다(Chapman, 1976).

모든 측정치에 있어 조사 시기 및 장소(방형구)에 따른 차이는 mixed model의 2원배치 분산분석으로 유의성을 검정하였다.

## 3. 결 과

### 3.1. 저수지 물 속의 Cu 함량

측정 시기 및 지점별 저수지 물 속의 Cu 농도 (Table 1)는 0~17.88 $\mu\text{g/l}$ 로 큰 차이를 나타내었으나, 6월 1일에는 W1, W3, W5의 3지점에서는 수심이 낮아 측정을 하지 못했으므로 이 3지점을 제외한 5지점에 대하여 측정시기 및 지점별 Cu농도의 2원배치 분산분석을 한 결과 측정시기별 평균치 사이에는 유의적인 차이가 없었으며 ( $F = 1.38, df = 2$  and 8,  $p > 0.05$ ), 채수지점별 평균치 사이에도 유의적 차이가 없었다( $F=1.52, df=4$  and 8,  $P>0.05$ ). 전 기간에 걸친 조사지역 저수지 물의 평균 Cu 농도는

Table 1. Acidity, depth(m), Cu concentration( $\mu\text{g/l}$ ), and Cu content per unit surface area ( $\text{mg/m}^2$ ) of reservoir water on each sampling date

Sampling point	May 1				May 15				June 1			
	pH	depth	Cu( $\mu\text{g/l}$ )	Cu( $\text{mg/m}^2$ )	pH	depth	Cu( $\mu\text{g/l}$ )	Cu( $\text{mg/m}^2$ )	pH	depth	Cu( $\mu\text{g/l}$ )	Cu( $\text{mg/m}^2$ )
W-1	8.1	1.4	13.19	18.47	7.5	1.1	12.27	13.50	-	0.2	-	-
W-2	8.2	0.7	12.66	8.86	7.4	0.7	13.64	9.55	10.5	0.5	27.88	13.94
W-3	7.9	0.6	9.29	5.57	7.7	0.9	2.73	2.46	-	0.2	-	-
W-4	7.8	0.6	12.84	7.70	8.5	1.0	11.36	11.36	10.2	0.5	0.91	0.46
W-5	7.9	1.7	11.77	20.01	9.1	1.6	12.73	20.37	-	0.2	-	-
W-6	8.4	1.2	8.40	10.08	9.0	1.0	13.18	13.18	9.2	0.6	0.48	0.29
W-7	9.4	1.0	6.81	6.81	9.2	0.7	14.09	9.86	9.5	0.6	1.16	0.70
W-8	9.3	2.7	6.24	16.85	9.3	1.8	13.64	24.55	9.9	0.7	ND	ND
mean	8.4	1.2	10.15	11.79	8.5	1.1	11.71	13.10	9.9	0.4	6.09	3.08

9.77 ± 2.96 µg/l (평균 ± 0.95 신뢰범위, 이하 같음)이었다.

저니가 노출된 후 그 위에 발달하는 식생이 저니로부터 흡수하는 Cu의 양을 단위면적당 흡수량으로 나타내고 이를 물 속의 Cu의 양과 비교하기 위하여 각 채수지점에서의 저수지 단위표면적당 물의 Cu 함량(mg/m<sup>2</sup>)을 계산하여 Table 1에 함께 제시하였으며, 그 계산식은 Cu 농도(µg/l) × 10<sup>3</sup>(l/m<sup>3</sup>) × 수심(m) × 10<sup>-3</sup>(mg/µg) 이었다.

### 3.2. 강하분진 중의 Cu 함량

조사지역 인근에 설치한 포집기에 분진의 형태로 강하한 Cu는 주로 1.0 µm 보다 작은 호흡성 분진(김동술 외, 1990)의 형태로 강하하였다(Table 2).

조사기간 120일 동안에 강하한 Cu의 총량은 P2보다 P1에서 더 컸으며, 두 지점 평균은 1301.26 µg/m<sup>2</sup>이었다. 따라서 조사지역에 강하분진에 의해 유입된 Cu의 양은 10.84 ± 2.53 µg/m<sup>2</sup>/day 였다고 추정할 수 있으며, 4월 초순과 6월 후반에 최고치를 나타내었다(Fig. 2).

### 3.3. 저니 중의 Cu 함량

노출된 저니의 Cu 농도(Table 3)는 표본에 따라 차이가 컸으며, 장소(S1~S3)에 따른 차이는 나타나지 않았다(F = 5.18, df = 2 and 30, p > 0.05). 그러나 시간이 경과함에 따라서는 현저한 감소를 나타내어(F = 26.23, df = 4 and 30, p < 0.05), 노출 직후에는 26.85 ± 1.20 µg/g 이었으나 약 40일 후인 7월

Table 2. Atmospheric deposition(µg/m<sup>2</sup>) of Cu by fallout particles near study area during each sampling period.

Periods	Days	P1			Total	P2			Mean
		<1.0µm	>1.0µm	Total		<1.0µm	>1.0µm	Total	
Mar 26 - Apr 11	16	328.08	2.21	330.29	288.43	0.19	288.62	309.46	
Apr 11 - Apr 30	19	218.46	15.20	233.66	93.96	28.33	122.29	178.02	
Apr 30 - May 9	9	74.90	0.42	75.32	13.31	0.72	14.03	44.68	
May 9 - May 17	8	79.67	ND	79.67	57.66	ND	57.66	68.67	
May 17 - May 30	13	122.71	19.67	142.38	66.50	10.67	77.17	109.78	
May 30 - Jun 13	14	111.68	20.54	132.22	6.94	31.89	38.83	85.53	
Jun 13 - Jun 27	14	241.56	28.99	270.55	177.35	17.65	195.00	232.78	
Jun 27 - Jul 11	14	92.43	59.16	151.59	96.88	62.37	159.25	155.42	
Jul 11 - Jul 24	13	61.24	46.31	107.56	70.49	55.94	126.43	116.99	
Total	120	1330.73	192.50	1523.23	871.51	207.76	1079.28	1301.26	

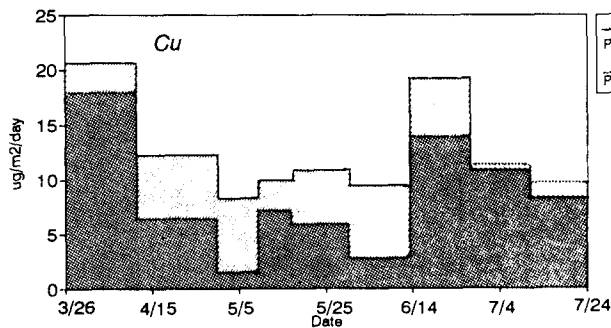


Fig. 2. Average daily deposition(µg/m<sup>2</sup>/day) of Cu by fallout particles on the two sampling points. □, P1 ; ▨, P2.

16일에는 2.80 ± 0.79 µg/g으로 약 90%가 감소하였다. 그러나 6월 25일에서 7월 6일 사이에는 오히려 약간 증가를 나타내었다.

저니 각 장소에 있어서의 조사시기에 따른 단위면적당 Cu 함량 (g/m<sup>2</sup>)도 Table 3에 함께 나타내었다. 그 계산식은 Cu 농도 (µg/g) × 10<sup>-6</sup> (g/µg) × 단위용적 (0.15m<sup>3</sup>) × 저니 비중 × 10<sup>6</sup> (g/m<sup>3</sup>) 이었으며, 저니 비중은 S1과 S2에서는 1.3, S3에서는 1.2 이었다. 저니 단위면적당 Cu 함량은 저니 노출 직후인 6월 5일의 5.094g/m<sup>2</sup>에서 7월 16일에는 0.530g/m<sup>2</sup>으로 89.6%가 감소하였다.

3.4. 저니 상의 식물의 생체량

노출된 저니의 S1, S2, S3 세 지점에서 조사된 식물은 모두 14종으로 동정되었다(Table 4). 유식물 단계를 벗어나지 않아 동정되지 못한 일부 식물은 기타로 나타내었으나 이들도 이 14종에 속하는 것으로 생각된다. 동정된 14종의 대부분은 1년생, 또는 2년생 식물이었으며, 다년생식물은 파대가리 (*Kyllinga brevifolia* var. *leiolepis* Hara)와 소리쟁이 (*Rumex crispus* L.) 의 2종 뿐이었다.

이들 중 봄여뀌 (*Persicaria vulgaris* Webb et Moq.)가 전체 식물 생체량 중 시기에 따라 68.1~86.4%를 차지하여 전 조사기간에 걸쳐 현저한 우점도를 나타내고 있었으며 그 우점도는 시간 경과에 따라 점차 증가하였다(Fig. 4a). 봄여뀌 이외의 대부분

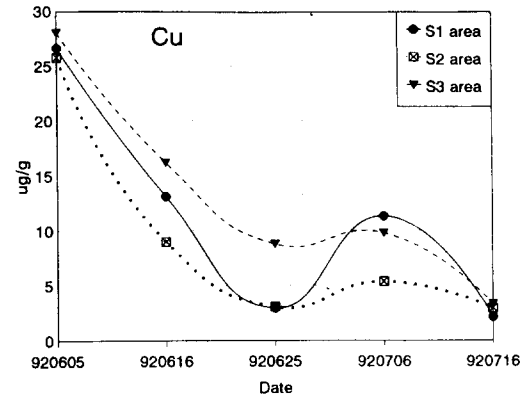


Fig. 3. Temporal change of Cu concentration ( $\mu\text{g/g}$ ) in the exposed sediment.

Table 3. Change in concentration ( $\mu\text{g/g}$ ) and content per unit surface area ( $\text{g/m}^2$ ) of Cu in the surface 0.15 m of exposed sediment.

Site	Cu concentration, $\mu\text{g/g}$					Cu content per unit surface area, $\text{g/m}^2$				
	Jun 5	Jun 16	Jun 25	Jul 6	Jul 16	Jun 5	Jun 16	Jun 25	Jul 6	Jul 16
S1	27.46	25.50	2.01	5.37	2.17	5.200	2.558	0.578	2.207	0.420
	26.79	5.43	5.53	2.83	3.14					
	25.75	8.42	1.35	25.75	1.14					
S2	28.48	14.04	2.12	4.43	2.36	5.031	1.754	0.600	1.044	0.572
	24.85	6.56	3.65	5.12	4.70					
	24.08	6.34	3.46	5.52	1.75					
S3	28.24	17.52	10.26	9.42	3.76	5.052	2.915	1.579	1.759	0.597
	28.82	3.22	6.98	10.50	3.42					
	27.15	27.85	9.08	9.39	2.76					
Mean	26.85	12.77	4.94	8.82	2.80	5.094	2.409	0.919	1.670	0.530

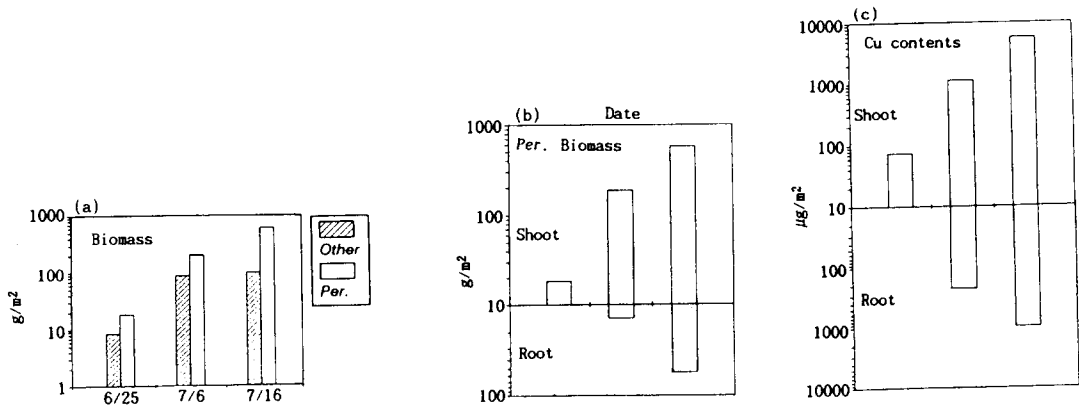


Fig. 4 (a) □, total biomass( $\text{g/m}^2$ ) of vegetation excluding *Persicaria vulgaris*, ▨, total biomass of *Persicaria vulgaris*; (b) shoot and root biomass( $\text{g/m}^2$ ) of *P. vulgaris*; (c) Cu content ( $\mu\text{g/g}$ ) in shoot and root of *P. vulgaris*, on the exposed sediment.

Table 4. Plant species on the exposed sediments of Shingal reservoir, and their biomass (g/m<sup>2</sup>) on successive sampling dates. Mean of 9 replicate samples.

Scientific Name	Jun 25	Jul 6	Jul 16
<i>Persicaria vulgaris</i> Webb et Moq.	18.26	203.04	630.91
<i>Fimbristylis dichotoma</i> for. <i>depauperata</i> Ohwi	1.28	13.69	23.13
<i>Panicum bisulcatum</i> Thunb.	-	17.65	55.99
<i>Barbarea orthoceras</i> Ledeb.	4.57	20.85	-
<i>Gnaphalium affine</i> D.Don	0.63	5.41	2.01
<i>Portulaca oleracea</i> L.	0.27	2.36	3.44
<i>Amaranthus lividus</i> L.	-	4.71	3.91
<i>Rorippa cantoniensis</i> Ohwi	-	3.24	0.18
<i>Kyllinga brevifolia</i> var. <i>leiolepis</i> Hara	-	1.28	0.93
<i>Alopecurus aequalis</i> var. <i>amurensis</i> Ohwi	-	2.81	0.89
<i>Lindernia procumbens</i> Borbas	-	2.66	-
<i>Chenopodium bryoniaefolium</i> Bunge	-	2.64	1.13
<i>Rumex crispus</i> L.	-	2.37	2.59
<i>Agrostis clavata</i> var. <i>nukabo</i> Ohwi	-	0.16	0.23
	1.79	6.38	4.68
Total	26.82	290.11	730.67

Table 5. Biomass(g/m<sup>2</sup>) and Cu concentration( $\mu$ g/g) of *Persicaria vulgaris* Webb et Moq. on the exposed sediment.

Organ	Sampling site	Biomass, g/m <sup>2</sup>			Cu concentration, $\mu$ g/g			
		Jun 25	Jul 6	Jul 16	Jun 25	Jul 6	Jul 16	
Shoot	S1	37.69	650.37	417.10	4.06	4.86	9.01	
		21.37	62.49	792.12	5.60	9.21	10.46	
		11.46	135.38	1007.31	3.48	3.08	6.12	
	S2	27.35	317.63	859.36	1.37	4.69	7.57	
		9.76	89.93	180.38	5.98	12.27	6.99	
		19.28	87.16	659.63	9.44	4.69	13.07	
	S3	15.82	71.46	275.31	2.33	2.44	10.46	
		6.30	96.29	821.86	1.63	2.60	13.65	
		15.33	188.43	162.93	1.37	13.57	11.91	
	Mean	18.26	188.79	575.11	3.92	6.38	9.92	
	Root	S1	-	53.04	40.28	-	11.03	20.82
			-	6.61	71.06	-	0.87	17.52
-			8.17	140.59	-	5.87	18.29	
S2		-	22.56	77.42	-	37.10	17.71	
		-	7.02	23.84	-	34.02	17.71	
		-	7.31	55.08	-	6.21	18.87	
S3		-	4.23	23.70	-	8.48	18.49	
		-	8.28	50.47	-	22.94	6.64	
		-	11.04	19.72	-	3.17	30.68	
Mean		-	14.25	55.80	-	14.41	18.52	
Total		18.26	203.04	630.91				

의 종들은 봄여뀌보다 늦게 종자가 발아하였고, 개기장(*Panicum bisulcatum* Thunb.) 이외에는 이러한 종들은 생체량이 크게 증가하지 못하였으며, 나도냉이(*Barbarea orthoceras* Ledeb.) 등 일부 종은 종자가 빨리 발아, 빠르게 생활환을 완성하고 고사하였다.

지상부와 뿌리의 생체량을 구분하여 조사한 봄여뀌의 경우, 첫 조사시기에는 뿌리의 생체량이 극히 작아 구분하지 않았으며, 그 이후 조사시기에도 뿌리의 생체량은 지상부 생체량의 8~10%에 불과하였다 (Table 5 and Fig. 4b).

### 3.5. 식물체 내 Cu 함량

신갈저수지 조사지역 내 노출저니 위의 식생 중 우점종인 봄여뀌의 체내 Cu 농도 (Table 5)는 지상부보다 뿌리에서 훨씬 높아, 마지막 조사시기인 7월 16일의 경우 지상부의 Cu 농도는  $9.92 \pm 2.07 \mu\text{g/g}$ , 뿌리의 Cu 농도는  $18.52 \pm 4.68 \mu\text{g/g}$ 이었다. 그리고 이러한 Cu 농도는 지상부와 뿌리 모두에서 시간 경과에 따라 현저히 증가하였다(지상부:  $F=14.07$ ,  $df=2$  and  $18$ ,  $p<0.05$ ; 뿌리:  $F=11.53$ ,  $df=1$  and  $12$ ,  $p<0.05$ ). 즉 봄여뀌는 시간이 경과함에 따라 생체량이 급격히 증가하고, 체내의 Cu 농도 또한 현저히 증가하여 많은 양의 Cu를 체내에 축적하는 것이다.

## 4. 고 찰

신갈저수지의 방류 후 노출된 저니 위에 나타나는 14 종의 관속식물이 대부분 1년생 식물인 것은 조사지역의 특수한 환경조건으로 인한 결과로 보인다. 조사지역은 매년 9~10 개월간 물에 잠겨 육상식물은 모두 사멸하므로 다년생 식물이 생존하기에는 부적당한 환경이며, 종자의 생산량과 산포능력이 큰 r-전략의 1년생 식물이 저니가 노출되는 2~3 개월간 빠르게 성장한다. 이러한 1년생 식물들도 개화, 결실하기 전에 저수지의 수위가 높아져 생활환을 완성하지 못하는 경우가 많으며, 종자는 대부분 하천에 의해 상류로부터 운반되어 오는 것으로 보인다. 또한 매년 2~3 개월 간 저니가 노출되므로 정수식물(hydrophte)은 생존할 수 없을 것이다.

신갈저수지는 저수면적이 비교적 작고 (211ha) 수

심이 얕은 (최대 12m) 저수지로서, 거의 일년 내내 유입되는 물을 저수했다가 매해 봄에 모내기를 위해 일시적으로 방류하며, 그 이외의 시기에 방류되는 물의 양은 많지 않다. 따라서 Cu와 관련해서도 하천수 및 강하분진에 의해 유입되는 양이 거의 일년 내내 저수지에 저장되었다가 일시적으로 방출된다고 할 수 있다. 그러므로 방류 직전의 저수지 물과 저니 속의 Cu 농도는 대체로 평형을 이루고 있는 것으로 생각할 수 있을 것이다.

전 조사기간에 걸친 조사지역 저수지 물 속의 Cu 농도는  $9.77 \pm 2.96 \mu\text{g/l}$ 로서 조사시기에 따른 차이를 나타내지 않았으며, 이것은 일반적인 물 속의 Cu 농도  $5 \mu\text{g/l}$  (Foerstner and Wittmann, 1981; 김남송, 1988; 황인담 외, 1989)보다는 상당히 높으나 국내의 호소 환경기준  $1.0 \text{mg/l}$  (환경처, 1991)에 비해서는 현저히 낮은 값이었다. 더구나 이 농도는 신갈저수지 상류지역에서 조사된 것으로, 최종 방류될 때에는 이보다 농도가 더 낮아질 것이다. 따라서 신갈저수지의 물을 관개용수로 사용하는 농작물 재배에 있어 Cu에 관한 한 수질오염의 문제는 거의 없는 것으로 생각된다. 그러나 단위면적당 물의 Cu 함량은 수심의 감소로 인해 방류 직전인 5월 15일의  $13.1 \text{mg}$ 에서 방류 직후인 6월 1일에는  $3.08 \text{mg}$ 으로 감소하였다. 저수지 물의 pH가 비교적 높은 것은 조류의 번식으로  $\text{CO}_2$  농도가 감소한 것이 한가지 원인으로 보이며, 따라서 물속에 존재하는 Cu는 주로 불용성의 형태로 존재 (Faust and aly, 1981)하고 있을 것으로 생각된다.

저니의 Cu 함량은 방류 직후인 6월 5일  $5.094 \text{g/m}^2$ 로 가장 높았다가 급격히 감소하였다. 저니 상에 식물이 성장하기 시작한 후부터는 이와 같은 감소의 일부는 식물에 의한 흡수로 인한 것이지만, Table 5에 나타난 것과 같이 그 양은 상대적으로 작다. 따라서 이러한 감소는 대부분 수위의 저하 및 강우 등에 의해 가용성 Cu가 표면 15 cm 이하로 이동되었기 때문인 것으로 보인다(Williams *et al*, 1984). 방류 직전의 저니의 Cu 농도가 방류 직후와 큰 차이가 없는 것으로 간주한다면, 이는 단위면적당 물과 저니에 존재하는 Cu 총량의  $13.1 / (13.1 + 5094) = 0.3\%$ 만이 물 속에, 그리고 99.7%가 저니 속에 존재하고 있다는 것을 의미한다. 이와 같은 저니에 편중된 분포는 Cu가 점토와 유기물 등 입자에 강하게 흡착되



고, pH가 증가함에 따라 용해도가 급격히 감소( Miller and Donahue, 1990)하기 때문일 것이다. 그러나 6월 25일에서 7월 6일 사이에는 오히려 약간의 증가가 나타나고 있으며, 이것은 저니 표면에서의 물의 증발에 따라 모세관현상에 의해 가용성 Cu가 15 cm 이하로부터 표층으로 상승한 것으로 보인다. 저니 중의 Cu 농도의 이와 같은 증감의 원인에 관해서는 보다 상세한 조사가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

강하분진에 의해 신갈저수지로 유입되는 Cu의 양은 1일 평균  $10.84\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{day}$ 이었으며, 1년간 유입된 Cu가 전량 저수지에 저장된다면 그 총량은  $3.957\text{mg}/\text{m}^2$ 이다. 신갈저수지는 1954년에 준공(용인군, 1990)되었으므로, 약 38년간 매년 같은 양의 Cu가 강하분진에 의해 유입되었다면 그 총량은  $150.35\text{mg}/\text{m}^2$ 로, 방류 직후에 농도가 가장 높을 때의 저니 중의 Cu 함량의 3.0%에 불과하였다. 따라서 신갈저수지 내 Cu는 거의 전량 신갈천 등 하천에 의해 유입된 것이라고 할 수 있다.

최종 조사일인 7월 16일 봄여뀌의 Cu농도는 지상부 및 뿌리에서 각각  $9.92$  및  $18.52\mu\text{g}/\text{g}$ 으로서 같은 시기 저니 중의 Cu 농도에 비하여 뿌리의 Cu 농도는 6.6배, 지상부의 Cu 농도는 3.5배였다. 그러나 이와 같은 봄여뀌의 Cu 축적율은 metallophyte (Larcher, 1980)로 알려진 일부 식물에 비하면 극히 작은 값이다. 이는 물론 종에 따른 차이라 하겠으나, 이들 봄여뀌의 경우 생육기간이 약 40 일이라는 짧은 기간이었던 것도 하나의 원인일 것이다. 또한 7월 16일 현재 저니의 Cu 농도와 봄여뀌의 Cu 농도 사이에는 상관관계가 존재하지 않았다(뿌리 :  $r = -0.201$ ,  $n = 9$ ,  $p > 0.05$  ; 지상부 :  $r = 0.083$ ,  $n = 9$ ,  $p > 0.05$ ). 이것은 김재봉 외 (1980)와 김현희 (1986)의 보고와도 일치하는 것으로, 봄여뀌 체내의 Cu가 단순히 저

니로부터 확산되어 들어온 것이 아니고 봄여뀌가 Cu의 체내로의 이동에 대하여 선택적으로 작용하였음을 나타내는 것으로 생각된다. 한편 같은 시기의 저니의 Cu농도와 봄여뀌 뿌리의 생체량 사이에는  $r = -0.690$  ( $n = 9$ ,  $p < 0.05$ )의 상관관계가 존재하였으며, 저니의 Cu 농도와 봄여뀌 지상부의 생체량 사이에는 유의적인 상관관계가 존재하지 않았다( $r = 0.584$ ,  $n = 9$ ,  $p > 0.05$ ). 이것은 지상부보다 Cu농도가 높은 뿌리의 경우 Cu로 인한 성장 억제 가능성 을 나타내는 것으로 생각된다.

봄여뀌의 뿌리 생체량이 지상부 생체량에 비해 매우 작은 것은 저니에 수분과 영양염류가 풍부하기 때문인 것으로 생각된다. 뿌리와 지상부 별로 봄여뀌의 단위면적당 생체량( $\text{g}/\text{m}^2$ )과 체내 Cu 농도( $\mu\text{g}/\text{g}$ )를 곱하여 봄여뀌가 단위 저니면적당 흡수한 Cu 총량( $\text{mg}/\text{m}^2$ )을 Table 6에 나타내었다. 6월 25일의 저니 단위면적당 봄여뀌내 총 Cu 양을 1 이라 할 때, 11일 후인 7월 6일의 총 Cu 량은 18.5, 다시 10 일 후인 7월 16일에는 90.4로 증가하였다(Fig. 4c).

노출된 저니 위에 자라는 봄여뀌가 41일 동안에 흡수한 Cu 의 양은  $6.612\text{mg}/\text{m}^2$ 로서 노출저니내 최대 Cu 함량의 0.130%, 또는 노출된 저니에서 40일간에 감소하는 Cu의 양의 0.145%에 불과하나, 방류 직전의 물의 Cu함량 ( $13.10\text{mg}/\text{m}^2$ )의 50.5%, 강하분진에 의해 1년에 유입되는 양( $3.956\text{mg}/\text{m}^2$ )의 167%에 달하였다. 그러나 이것은 봄여뀌에 의한 흡수만을 고려한 것으로, 다른 식물도 봄여뀌와 같은 비율로 Cu를 흡수한다고 가정하면 식물에 의한 Cu의 총흡수량은  $7.653\text{mg}/\text{m}^2$ 이 될 것이고, 이것은 노출 저니 내 최대 Cu 함량의 0.150%, 노출된 저니에서 40일간에 감소하는 Cu의 양의 0.168%일 뿐이나 강하분진에 의해 1년에 유입되는 양의 193% 된다. 그리고 신갈저수지의 전 노출 저니 25 ha에서 전체 식물군집이

Table 6. Biomass ( $\text{g}/\text{m}^2$ ), Cu concentrations ( $\mu\text{g}/\text{g}$ biomass) and contents per unit sediment surface area ( $\text{mg}/\text{m}^2$ ) in *Persicaria vulgaris* Webb et Moq. on the exposed sediment of Shingal reservoir. Mean of 9 replicate samples.

	Biomass			Cu concentration $\mu\text{g}/\text{g}$			Cu concentration $\mu\text{g}/\text{g}$		
	Jun 25	Jul 6	Jul 16	Jun 25	Jul 6	Jul 16	Jun 25	Jul 6	Jul 16
Shoot	18.26	188.79	575.11	3.92	6.38	9.92	0.073	1.126	5.627
Root	-	14.25	55.80	-	14.41	18.52	-	0.225	0.985
Total	18.26	203.04	630.91				0.073	1.351	6.612

1년에 총 1913.3 g의 Cu를 흡수한다고 할 수 있다. 장마가 늦어져 노출저니 상에 식물이 더 오랜 기간 성장할 수 있는 해에는 이 양도 더 증가할 것이다. 저니 위의 식생이 저수지의 물로부터 직접 Cu를 흡수하는 것은 아니지만, 저니로부터 이러한 양의 Cu를 흡수하면 저니가 물 속의 Cu를 흡착하는 능력이 그만큼 증가될 것이므로 이는 저수지 수질 정화에 작지 않은 기여를 할 수 있을 것이다.

이들 식물은 장마로 인해 수위가 높아지면 모두 물에 잠겨 분해되면서 체내의 Cu를 수중으로 방출하게 되므로, 저니에 축적되었던 Cu가 식물에 흡수되었다가 다시 수중으로 방출되어 물속의 Cu농도를 증가시키는 원인이 될 수도 있다. 그러나 이들 식물의 분해로 인해 물속에 부식산 등의 유기물 함량이 증가되어, 분해되는 식물체로부터 방출되는 Cu와 결합, 침전되면 이와 같은 증가는 일어나지 않을 수도 있다.

따라서 신갈저수지의 전체적인 Cu 동태를 알기 위해서는 노출된 저니에서 자라는 식물에 의한 저니 중의 Cu의 흡수만이 아니라 식물의 분해에 따르는 방출 및 그 후의 동태와 유입수의 양, 물과 저니 속의 미생물, 조류, 어류 등 다른 생물들에 의한 흡수와 그들의 분해, 방류수의 양 등에 관한 추가 조사가 있어야 할 것이며, 이에 관한 계속적인 연구가 진행된다면 저수지에서의 Cu의 물질순환을 응용한 폐수처리시스템 개발에도 큰 기여를 할 수 있을 것이다.

## 5. 결 론

신갈저수지는 저수면적 211ha의 수심이 비교적 얇은 저수지로서 조사년도인 1992년의 경우 5월 20일 경부터 모내기를 위하여 물이 방류되기 시작하여 6월 2일경에 약 25ha에 달하는 저니가 노출되었다. 이 노출된 저니에는 1년생 식물을 주로 하는 총 14종의 관속식물로 이루어진 식물군집이 발달하였는데, 그 중 봄여뀌(*Persicaria vulgaris* Webb et Moq.)가 시기에 따라 총생체량의 68.1~86.4%를 차지하는 우점종이었다.

전 조사기간에 걸친 조사지역 저수지 물속의 Cu 농도는  $9.77 \pm 2.96 \mu\text{g/l}$ 로서 조사시기에 따른 차이를 나타내지 않았으며, 이것은 일반적인 물 속의 Cu

농도  $5\mu\text{g/l}$  (Foerstner and Wittmann, 1981; 김남송, 1988; 황인담 외, 1989)보다는 상당히 높으나 국내의 호소 환경기준  $1.0\text{mg/l}$  (환경처, 1991)에 비해서는 현저히 낮은 값이었다. 그러나 단위면적당 물의 Cu 함량은 수심의 감소로 인해 방류 전인 5월 15일의  $13.10\text{mg/m}^2$ 에서 방류후인 6월 1일에는  $3.08\text{mg/m}^2$ 로 감소하였다.

물의 방류로 인해 노출된 저니의 표층 0.15m의 Cu 농도는 노출 직후인 6월 5일의  $26.85 \pm 1.20\mu\text{g/g}$ 에서 40일 후인 7월 16일에는  $2.80 \pm 0.84\mu\text{g/g}$ 로 감소하였다. 따라서 노출된 저니 단위면적당의 Cu 함량은  $5.094\text{g/m}^2$ 에서  $0.530\text{g/m}^2$ 으로  $4.564\text{g/m}^2$ 가 감소한 것이다. 이와 같은 감소량은 저니 위 발달하는 식물 군집에 의한 흡수량( $6.612\text{mg/m}^2$ )보다 월등히 큰 것으로, 주로 식물이 성장하기 전에 수위 저하와 강우 등으로 인해 표토에서 심토로 스며들거나 주변 수중으로 유출되는 것으로 생각된다. 또한 저니가 노출되기 직전의 물의 Cu 농도와 저니가 노출된 직후의 저니의 Cu 농도로 미루어 저수지 단위면적당 존재하는 Cu의 총량의 99.7%가 저니에, 0.3%가 물속에 존재하는 것으로 추정된다.

조사기간 중 강하분진으로 인한 Cu의 유입량은 조사지역 인근에서  $10.84 \pm 2.53 \mu\text{g/m}^2/\text{day}$ 였으며, 따라서 신갈저수지가 완공된 1954년 이래 38년간의 총 유입량은  $150.35\text{mg/m}^2$ 라 할 수 있다. 이것은 노출된 저니 단위면적당 최대 Cu 함량  $5.094\text{g/m}^2$ 의 3.0%에 불과한 양이다. 따라서 신갈저수지 내에 존재하는 Cu는 거의 전량 하천에 의해 유입된 것으로 보인다.

저수지 물의 방류로 노출된 저니 상에 발달하는 식물군집 중 우점종인 봄여뀌는 조사기간인 41일 동안에 저니로부터  $6.612\text{mg/m}^2$ 의 Cu를 흡수하였으며, 다른 식물도 봄여뀌와 같은 정도의 흡수율을 나타낸다고 가정하면 저니 상의 전체 식물군집은  $7.653\text{mg/m}^2$ 의 Cu를 흡수했다고 할 수 있다. 따라서 신갈저수지의 전체 노출저니 25 ha에서 식물군집이 한 생육기간에 총 1913.3g의 Cu를 흡수하는 것으로 추정할 수 있다. 그러나 최종 조사일인 7월 16일의 저니의 Cu 농도와 봄여뀌 뿌리의 생체량 사이에는  $r = -0.690$ 의 상관관계가 존재하여, 뿌리의 경우 저니 중의 Cu로 인한 성장억제의 가능성을 나타내었다.

## 참 고 문 헌

- 김남송, 1988, 만경강 담수에 중 중금속 함량에 관한 연구, 예방의학회지, 21, 121~131.
- 김복영, 김재규, 이민호, 1982, 한국 논 토양 및 현미 중 중금속의 천연부존량에 관한 조사, 농사 시험연구소보, 24, 51~57.
- 김동술, 김희강, 김신도, 김태오, 1990, 수용모형을 이용한 강하분진의 농도분포에 관한 연구, 대한환경공학회지, 12 (1), 1~9. 김재봉, 김동한, 정연보, 오재기, 최광수, 강덕희, 1980, 7 중금속에 의한 토양오염과 농작물내 함량의 상관관계에 관한 연구, 국립환경연구소보, 2, 203~211.
- 김현희, 1986, ICAP 분석법에 의한 수중식물과 저질 중의 중금속 함량 및 그 상관관계, 성균관대학교 대학원 석사학위논문, 서울, 39 pp.
- 용인군, 1990, 용인군지, 1707 pp.
- 정국삼, 1987, 산업안전공학개론, 동화기술, 서울, 279 pp.
- 정완호, 이해풍, 1987, 교통량이 다른 고속도로변 생태계의 영양단계별 납과 카드뮴 함량의 차이, 한국생태학회지, 10 (1), 7~16.
- 환경처, 1992a, 환경오염 공정시험법, 대기편, 동화기술, 서울, 818 pp.
- 환경처, 1992, 환경오염 공정시험법, 수질편, 동화기술, 서울, 803 pp.
- 환경처, 1991, 한국환경연감, 679 pp.
- 황인담, 기노석, 정인호, 최문철, 이재형, 1989, 만경강 주요 지천수의 이화학적 검사 및 대장균군의 분포에 관한 연구, 한국환경위생학회지, 15 (1), 11~23.
- Chapman, S. B., 1976, Methods in Plant Ecology, John Wiley & Sons, NY, 536 pp.
- Faust, S. D. and O. M. Aly, 1981, Chemistry of Natural Waters, Ann Arbor Science, Butterworths, 400 pp.
- Foerstner, U. and G. T. W. Wittman, 1981, Metal Pollution in the Aquatic Environment, Springer Verlag, Heidelberg, 486 pp.
- Lagerwerff, J.V. and A. W. Specht, 1970, Contamination of roadside soil and vegetation with cadmium, nickel, lead, and zinc, Environ. Sci. Technol., 4 (7), 583~586.
- Larcher, W., 1983, Physiological Plant Ecology, Springer-Verlag, Berlin, 303 pp.
- Lisk, D. J., 1972, Trace metals in soils, plants and animals, *In Advances in Agronomy*, 24, 267~325, Academic Press, New York.
- Miller, R. W. and R. L. Donahue, 1990, Soils : an Introduction to Soils and Plant Growth, 6th ed., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 768 pp.
- Pouyat, R.V. and M. J. McDonnell, 1991, Heavy metal accumulations in forest soils along an urban-rural gradient in southeastern New York, USA, Water, Air and Soil Pollution, 57-58, 797~807.
- Steinnes, E. and E. M. Andersson, 1991, Atmospheric deposition of mercury in Norway : temporal and spatial trends, Water, Air, and Soil Pollution, 56, 391-404.
- Sumitomo Chemical Co., Ltd., 1992, EXPAPIER Operation manual, 3 pp.
- Williams, D.E., J. Vlamis, A. H. Pukite, and J. E. Corey, 1984, Metal movement in sludge-treated soils after six years of sludge addition. I. Cadmium, copper, lead, and zinc, Soil Science, 137 (5), 351~359.