

## 대전시 신대동 폐기물매립지 주변지역에서의 지하수 및 토양의 중금속오염

### Heavy Metal Contamination in Soils and Groundwater in the Vicinity of the Sindae-dong Waste Disposal Site, Taejon

김경웅 (Kyoung-Woong Kim)\* · 손호웅 (Ho-Woong Shon)\*

**요 약** : 폐기물 매립지로부터의 침출수의 유출에 의한 지하수와 토양의 오염은 심각한 환경문제중의 하나이며, 일반적으로 매립지에서는 폐기물의 생화학적 자연분해 또는 강우 침투에 의하여 침출수가 형성된다. 대전시 신대동 일반 폐기물 매립지 주변토양의 Cu, Pb와 Zn 함량은 대부분의 우리나라 토양내의 평균 함량보다는 높은 것으로 나타났으나 농작물을 통하여 인류에 해를 끼칠 수 있는 정도는 아닌 것으로 나타났다. 지하수의 경우 Cu, Pb와 Zn이 검출되지는 않았으나 특정 시료의 pH가 5.6으로 나타나 음용수로는 부적합한 것으로 판명되었다. 토양오염이 발견된 지역에서는 심토내의 중금속 원소 함량이 표토보다 높은 것으로 나타나 지하수를 통한 오염체의 영향이라고 판단된다. 전기 비저항 탐사를 행한 결과 토양오염이 진행된 지역에 함수층이 존재하고 있었으며 침출수의 배출에 의한 오염체의 이동에 의해 전기 비저항값이 더욱 낮게 나타났다. 한편 침출수의 배출지점에서 멀어질수록 오염물질의 감소에 의해 전기 비저항치가 증가하는 것으로 나타났으며 실제로 토양내의 중금속원소 함량도 감소한다.

**Abstract** : Groundwater and soil contamination by the leak of leachates from the waste disposal site (WDS) is one of the serious environmental problems, and leachates are generally produced by the biogeochemical decomposition and/or precipitation in the WDS. At the Sindae-dong waste disposal site in Taejon, the average Cu, Pb and Zn concentrations in the surrounding soils are higher than those in other Korean soils but these are not high enough to cause any harmful effect to man through the crop plants. Copper, Pb and Zn are not detected in the groundwater samples but the pH of the sample is 5.6 which is not suitable for the drinking water. In contaminated soil samples, the heavy metal concentrations are higher in subsurface soil than in surface soil and it may be influenced by the leachates in groundwater. With the electric resistivity method, the water containing layers are found in contaminated soils and the resistivity values are considerably low because of the dispersion of plume by the leak of leachates. According to the distance from the leak point of leachate, resistivity values increased and heavy metal concentrations in soils decreased due to the reduction of plume.

### 서 론

인간은 생활과 산업활동에 의해 필연적으로 폐기물을 생산하게 되며, 결과적으로 대도시 주변에는 도시 및 산업폐기물 매립지의 크기와 수가 늘어가고 있는 실정이다. 특히 대전권역은 급격한 도시팽창과 발전에 따라 일반폐기물 배출량이 급속하게 증가하여 약 200톤/일 이상에 이르며, 이의 위생적이고 효율적인 최종처분을 위해 시에서는 대덕구 신대동에 총 71,000평의 장기위생매립장을 조성하여 매립중이다(대전직할시, 1991).

수질오염원으로서의 중금속은 풍화에 의한 자연적인 근원과 광석이나 금속을 채굴하는 산업체에서 유래된 것, 각종 산업활동과 관련된 금속과 그 화합물의 사용시에 배출된 것, 도시쓰레

기나 고체 폐기물에서 침출되어 나오는 것, 사람이나 가축의 배설물에서 유래된 것이다. 특히 도시쓰레기나 고체 폐기물 처리장의 침출수는 각종 중금속의 주요한 근원이 되며, 이는 버려진 쓰레기에 함유된 유기물이 분해되면서 혐기성 상태가 될때 중금속을 용출시킬수 있다(Adriano, 1986).

중금속오염은 하천이나 호수와 같은 지표수에만 나타나는 것이 아니고 토양오염과 관련되어 지하수까지 오염시킬 수 있다(McGuinness, 1983). 대부분의 지하수는 토양의 자정작용에 의해 안전하다고 믿어져 왔으나 폐기물 매립장부근에서 심한 오염사례가 지적되고 있다(Wadleigh, 1968). 본 연구대상지역인 신대동 매립지는 금강 상류인 갑천에 접하고 있어 매립장으로부터의 침출수의 유출은 지하수오염을 유발하고, 이때 생성된 지하수 오염체는 토양을 통하여 이동되어 근접한 거리에 있는 갑천으로 유입되어 지표수오염을 발생시킬 가능성이 있다.

토양오염과 지하수에 의한 오염체의 이동과의 관계는 전기비

\*배재대학교 국제자원개발학과 (Department of International Resources Development, Paichai University, 439-6 Doma-2-dong, Seo-gu, Taejon 302-735, KOREA)

저항탐사에 의해 밝혀질 수 있다. 침출수나 염수에 의하여 오염된 지하수는 이에 의해 오염되지 않은 지하수에 비하여 전기전도도가 상당히 낮은 전기비저항치를 보이게 된다(Zhody *et al.*, 1974). 이는 오염된 지하수에 많은 전해물질이 포함되어 있기 때문이다.

대전시는 신대동에 일반 폐기물매립지를 조성하며 지역주민들에게 수도를 설치해 주어 지하수의 사용을 금지해 왔으나 아직도 농작물 재배등의 여러가지 용도로 지하수를 사용하고 있을 뿐만 아니라 매립지가 갑천에 인접하고 있어 갑천의 오염은 결과적으로 중부권의 식수 원인 금강을 오염시킬 수 있다. 따라서 매립지 부근지역에서의 오염문제를 과학적으로 대처하기 위해서 매립지 주변지역에서의 토양 및 지하수 오염정도를 파악하고 전기비저항 탐사에 의하여 침출수에 의한 지하수의 오염범위와 이동방향을 추적하고자 한다.

### 지형 및 지질

신대동 매립지는 대전의 중북부지역으로 갑천과 유동천의 합류지점의 북부에 위치하고 있으며(Figure 1), 해발 50-150 m의 평탄지로서 경사도 5° 이하의 평지가 절반이상을 차지하고 있다(대전직할시, 1991). 이 지역의 거의 대부분을 차지하는 암석은 백악기의 편상화강암과 그후에 관입한 복운모화강암이다. 이 편상화강암의 광물조성은 후기의 복운모화강암과 큰 차이가 없지만 단지 편상구조를 갖고 있어 곳에 따라서는 박편으로 균열이 발달하는 곳도 있다. 이 두 종류의 화강암은 심한 풍화에 의하여 구릉화되어 있으며, 곳에 따라서는 충적층과의 경계마저도 구분이 힘들 정도로 경사가 완만해져 매립장과 갑천 사이에는 충적층의 평탄지가 발달되었다(박희인 외, 1977).

편상화강암의 신선하고 치밀한 암석에는 지하수개발이 거의 불가능하나 편리의 발달에 따라 약간의 지하수를 기대할 수 있으며, 대체로 100 m 심도에서 정당 100 m<sup>3</sup>/d 내외의 지하수를 기대할 수 있는 것으로 보고되었다(임정웅 등 1982)

### 시료채취 및 분석

지하수 시료는 매립지 서쪽 주변지역의 가정에서 펌프로 끌어올려지는 지하수를 채취 하였다. 따라서 이 연구에서 언급하는 지하수는 자유면 대수층조건의 지하수이다. 각각의 시료마다 양이온 분석용시료와 음이온 분석용시료를 구분하여 채취하였으며, 양이온 분석용 시료에는 질산을 가하여 pH를 1 이하로 조정하였다. 모든 시료에는 0.45 μm Nitrocellulose Membrane Filter를 이용하여 부유물질을 제거하였으며, 수소이온농도(pH)는 현장에서 pH meter로 측정하였다. 한편 매립지주변 지역 지하수시료의 오염도를 비교하기 위하여 오염원의 영향을 받지 않은 것으로 생각되어지는 비교시료를 대전소재 배재대학교 뒷산 4곳의 약수터에서 채취하여 함께 분석하였다.

토양은 표토(0-15 cm 깊이)와 심토(15-30 cm 깊이) 시료로 구성되었으며, 채취 후 자연광에서와 전기오븐에서 40°C로 건조시켰다. 그 중 약 50 g 정도의 시료를 4분법에 의하여 취한 후, 80mesh(180 μm)까지 분쇄한 후 시료봉투에 넣어 봉하였다.

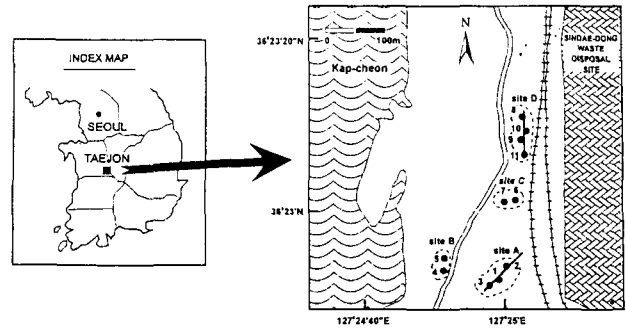


Figure 1. Sampling locations in the Sindae-dong waste disposal site, Taejon (solid lines in site A and D: electric resistivity survey lines).

하나의 표토시료는 2×2 meter의 격자위에서 채취한 9개의 부시료로 구성되었으며, 심토는 적어도 3개의 부시료를 가진다. 토양시료는 질산/과염소산으로 처리한 후에(Thompson and Wood, 1982), 지하수시료와 함께 원자흡광 분석기(Atomic Absorption Spectrometer)로 Cu, Pb, Zn 등의 중금속원소를 측정하였다. 모든 분석결과는 Quality control system을 이용하여 평가된 후 사용되어졌다(Ramsey *et al.*, 1987). 한편 연구지역의 지하관찰을 위한 전기탐사는 Wenner 전극 배열법을 사용하여 (Telford *et al.*, 1990), 각 pole에서 수직탐사를 실시하였으며 pole 간격은 3 m로 하였다.

### 결과 및 논의

#### 토양 및 지하수내의 Cu, Pb, Zn 함량과 pH

폐기물 중 일반폐기물로 분류되는 도시쓰레기에 의해 토양내 Cu와 Zn 함량이 높게 나타날 것으로 예상되었으나(Purves and Mackenzie, 1973), 신대동 매립지 주변지역의 표토(0-15 cm 깊이)와 심토(15-30 cm 깊이)내의 Cu, Pb와 Zn의 함량은 토양내 평균함량과 유사한 것으로 나타났다(Table 1). 표토와 심토에서 평균 Cu 함량은 9.8 μg/g으로 토양내의 평균함량 12 μg/g과 유사한 결과를 보였으며(Berrow and Reaves, 1984), 우리나라 토양내 Cu 허용치인 125 μg/g을 훨씬 밑도는 것으로 나타났다. Pb의 경우 표토와 심토내의 평균 함량은 모두 19 μg/g으로 토양내 평균 함량 15 μg/g보다는 약간 높은 것으로 나타났으나(Berrow and Reaves, 1984), 미국전역에 걸친 Pb 평균 함량 19 μg/g과는 유사함을 알 수 있다(Shacklette and Boerngen, 1984). Zn의 경우, 표토와 심토내의 평균 함량(78 μg/g, 174 μg/g)이 토양내 평균 함량 40 μg/g보다 높은 것으로 나타났다(Berrow and Reaves, 1984). 특히 D지역 9번 심토의 경우 Zn 함량 이외에도 Cu와 Pb 함량이 높은 것으로 나타나 이에 대한 연구가 필요하였다.

매립지 주변지역의 토양은 Cu와 Pb가 양의 상관관계를 보이며(Figure 2), 대부분의 시료가 우리나라 토양내의 평균 함량인 5.0 μg/g Cu, 8.2 μg/g Pb 와 8.0 μg/g Zn(장원, 1990)보다는 다소 높으나 토양 중의 중금속 원소 함량의 최대 배경값인 100 μg/g Cu, 100 μg/g Pb와 300 μg/g Zn보다는 낮은 것

Table 1. Copper, Pb and Zn concentrations in soils ( $\mu\text{g/g}$ ).

site	I. D.	Cu		Pb		Zn	
		surface	subsurface	surface	subsurface	surface	subsurface
A	1	18.4	17.2	26.6	30.2	84.2	85.8
	2	6.8	5.6	11.6	10.4	83.2	88.4
	3	3.2	2.0	15.6	19.2	72.8	61.2
B	4	4.4	8.0	18.0	16.8	81.6	62.0
	5	8.2	8.4	13.0	22.0	55.8	58.4
C	6	27.2	15.6	34.0	29.2	92.8	71.6
	7	8.4	4.2	23.2	23.8	58.8	64.8
D	8	9.6	7.6	16.8	3.6	67.2	59.6
	9	3.6	44.4	12.4	36.0	118	1240
	10	14.4	6.0	18.0	8.4	76.0	65.5
	11	3.8	5.2	21.6	13.2	71.0	51.6
Mean		9.8	11.3	19.2	19.4	78.3	174
Std. Dev.		7.5	11.9	6.8	10.1	17.1	355

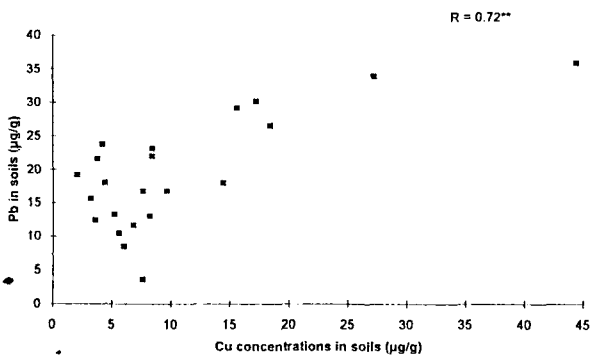


Figure 2. Copper and Pb concentrations in soils ( $\mu\text{g/g}$ ) (\*\*: significant at  $P=0.01$ ).

로 나타났다(Kloke, 1979).

오염이 진행되지 않은 토양의 경우 표토내의 유기물질과 관련된 생지구화학적 순환에 의하여 표토내의 중금속원소 함량이 심토보다 높은 것으로 알려져 있다(Rose *et al.*, 1979). 매립지주변 지역의 경우도 오염이 진행되지 않은 토양의 경우 표토내의 Cu, Pb와 Zn의 함량이 심토보다 높으며 통계적으로 각각 유의한 상관관계를 보인다(Figure 3). 그러나 D 지역 9번 시료의 경우 심토내의 원소 함량이 표토내의 함량보다 상당히 높은 것으로 나타나 매립에 의한 오염이 진행되었을 것이라 예상된다(Table 1).

Table 2에 나타난 것과 같이 조사지역 지하수의 경우 Cu, Pb와 Zn의 함량이 음용수 수질기준인  $1 \text{ mg/l}$  Cu,  $0.1 \text{ mg/l}$  Pb와  $1 \text{ mg/l}$  Zn을 넘지 않는 것으로 나타났(보건사회부, 1966). 그러나 D지역 중 9번 토양시료에 가깝게 위치한 지하수의 수소이온농도(pH)가 음용수 수질기준이 5.8 8.5보다 낮은 5.58으로 나타나 음료수로의 사용에 부적합한 것으로 판명되었다. D지역에 나타난 토양 및 지하수의 오염원과의 관계를 밝혀

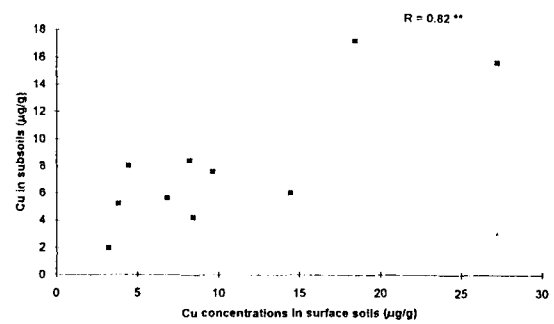


Figure 3. Heavy metal concentrations in surface and sub-surface soils ( $\mu\text{g/g}$ ) (\*: significant at  $P=0.05$ , \*\*: significant at  $P=0.01$ ).

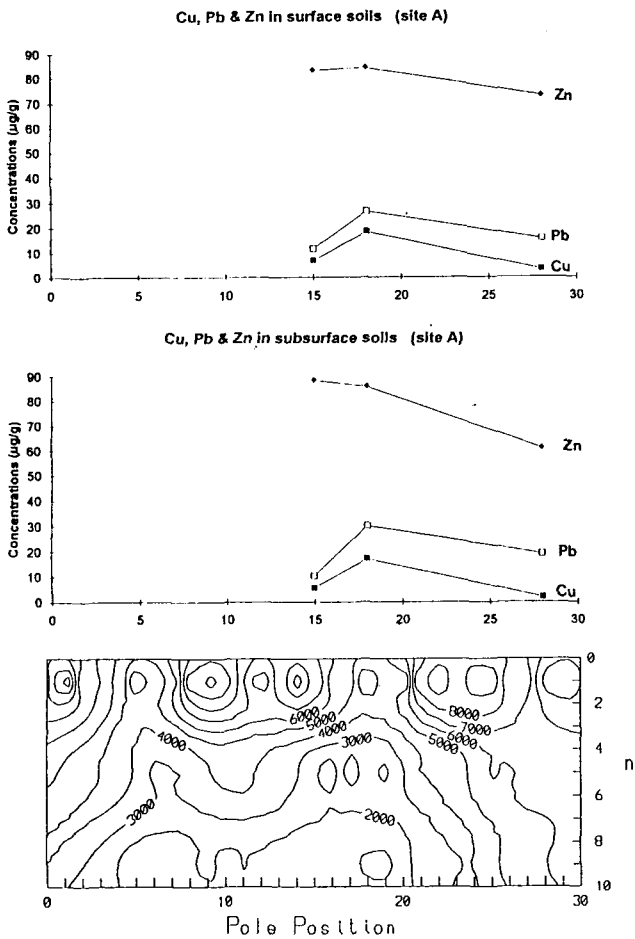
내기 위하여 전기비저항 탐사에 의한 오염체의 추적이 필요하다.

#### 오염체 추적을 위한 전기비저항 탐사

연구지역의 오염체 추적을 위하여 비오염지역인 A 지역과 오염지역인 D 지역에서 전기탐사를 실시하였으며, Wenner 전기전극 배열방법을 사용하여 각 pole 위치에서 수직탐사를 실시

**Table 2.** Copper, Pb, Zn concentrations (mg/l) and pH in groundwater.

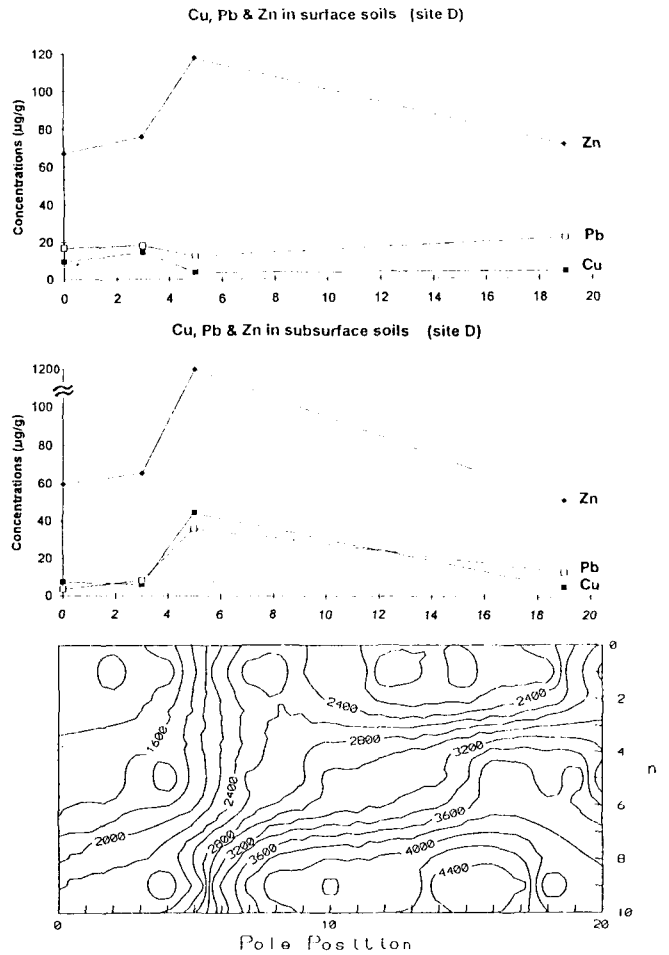
site	I. D.	Cu	Pb	Zn	pH
A	1	n.d	n.d	0.34	6.42
C	2	n.d	n.d	0.02	6.37
D	3	n.d	n.d	n.d	5.58
D	4	n.d	n.d	n.d	6.10
Fresh water		n.d	n.d	n.d	6.12



**Figure 4.** Apparent resistivity section (unit:  $\Omega \cdot m$ ) and heavy metal concentrations along profile in A site (n: pseudo-depth, pole interval: 3 m).

하였다. Figure 4에 나타난 수치는 외견 비저항치로서 A 지역의 경우 비저항치가 높아 물을 거의 포함하지 않은 표토의 두께가  $m=4$ (약 12 m) 정도되며 pole 번호가 21에서 30까지는 비합수 표토의 두께가 30 m 이상이 된다. 실제로 18번 pole 위치에서 우물이 위치하고 있으며 깊이는  $m=10$ (약 30 m)에 이른다.

D 지역의 경우 표토에서 낮은 전기비저항치를 보여 함수층이 지표 가까이 존재하고 있음을 보여주고 있다(Figure 5). 절개면의 지질구조에 근거하여 볼 때 파쇄대와 같은 지구조를 확인할



**Figure 5.** Apparent resistivity section (unit:  $\Omega \cdot m$ ) and heavy metal concentrations along profile in D site (n: pseudo-depth, pole interval: 3 m).

수 없었으므로 낮은 전기비저항치는 구조적 원인에 의한 함수량의 증가이기 보다는 오염체를 함유하고 있는 지하수에 의한 영향으로 판단된다. 그 중 가장 낮은 비저항치를 보여주는 pole 번호 5의 지점에서는 표토와 심토층의 Cu, Pb와 Zn 함량이 높은 것으로 나타나고 있다. 특히 국지적으로 심토층의 Zn 함량이  $1244 \mu\text{g/g}$ 까지 나타나 이는 쓰레기 매립으로 인한 침출수의 영향이라 판단되며, 실제로 이 지역에 침출수의 배출구가 위치하고 있었다. 한편 침출수 배출지점으로부터 멀어질수록, 즉 5번 pole의 오른쪽으로 갈수록 전기비저항치의 증가, 오염체 확산에 의한 지하수중 오염물질의 농도 감소현상이 나타나 토양내의 중금속원소 함량의 감소와 관계있는 것으로 판단된다(Figure 5).

### 결론

1. 대전시 신대동 일반 폐기물 매립지역 주변토양의 Cu, Pb와 Zn 함량은 대부분이 우리나라 토양내의 평균 함량보다는 약간 높은 것으로 나타났으나 농작물을 통하여 인류에 해를 끼칠

수 있는 정도는 아닌 것으로 나타났다. 지하수의 경우 Cu, Pb와 Zn이 검출되지는 않았으나 특정시료의 pH가 5.58로 나타나 음용수로는 부적합한 것으로 판명되었다.

2. 대부분의 토양은 표토내의 Cu, Pb와 Zn 함량이 심토보다 높았으나 높은 중금속원소 함량을 나타내는 지역에서는 심토내의 함량이 높은 것으로 나타나 지하수를 통한 오염체의 영향이라고 판단된다.

3. 오염지역의 원인을 알아보기 위하여 전기비저항 탐사를 행한 결과 토양오염이 진행된 지역에 합수층이 존재하고 있었으며 침출수의 배출에 의한 오염체의 이동에 의해 전기비저항값이 더욱 낮게 나타나고 있었다. 한편 침출수의 배출지점에서 멀어질수록 전기비저항치가 증가하는 것으로 나타났으며 실제로 토양내의 중금속원소 함량도 감소하여 오염물질의 감소와 관계가 있는 것으로 판단된다.

## 사 사

본 논문의 화학분석을 도와주신 서울대학교 자원공학과와 전효택 교수님과 응용지구화학실험실의 대학원생 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- 대전직할시, 1991, 대전직할시 쓰레기 장기위생 매립장 조성사업 타당성 조사보고서, 대전직할시, 370p.
- 박희인, 이준동, 정지곤, 1977, 한국지질도: 유성도폭, 21p.
- 보건사회부, 1966, 음용수 수질기준.
- 임정용, 이동영, 김영화, 박동근, 임창은, 1982, 수리지질도 설명서: 대전북부(갑천유역), 한국동력자원연구소, 50p.
- 장원, 1990, 오염예상지역과 비오염예상지역에서의 토양, 곡물내 중금속 함유량에 관한 연구, 서울대학교 환경대학원, 16p.
- Adriano, D.C., 1986, Trace elements in the terrestrial environment, New York, Springer-Verlag, 533p.
- Berrow, M.L. and Reaves, G.A., 1984, Background levels of trace elements in soils, Proc. Int. Conf. Environ. Contamination, p. 333-340.
- Kloke, A., 1979, Contents of arsenic, cadmium, chromium, fluorine, lead, mercury and nickel in plants grown of contaminated soil, UN-ECE Symposium.
- McGuinness, C.L., 1983, Ground water, in Tank, R.W., Ed., In-virgonmental Geology, p.433-443.
- Purves, D. and MacKenzie, E.J., 1973, Effects of applications on municipal compost on uptake of copper, zinc and boron by garden vegetables, Plant and Soil, v.39, p.361-371.
- Ramsey, M.H., Thompson, M. and Banerjee, E.K., 1987, Realistic assessment of analytical data quality from inductively coupled plasma atomic emission spectrometry, Anal. Proc., v.24, p. 260-265.
- Rose, A.W., Hawkes, H.E. and Webb, J.S., 1979, Geochemistry in Mineral Exploration, London, Academic Press, p.149-179.
- Shacklette, H.T. and Boerngen, J.G., 1984, Element concentrations in soils and other surficial materials of the conterminous United States, U. S. Prof. Paper, v.1270, p.1-105.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E., 1990, Applied Geophysics (2nd ed.), Cambridge, Cambridge Univ. Press, 770p.
- Thompson, M. and Wood, S., 1982, Atomic absorption methods in applied geochemistry, in Cantle, E.J., Ed., Atomic Absorption Spectrometry, p.261-284.
- Wadleigh, C.H., 1968, Wastes in relation to agriculture and forestry. Misc. Pub. No. 1065, U.S. Dept. Agr., Washington, D.C., 112p.
- Zhody, A.A.R., Eaton, G.P. and Mabey, D.R., 1974, Application of surface geophysics to groundwater investigations: techniques of water-resources investigation of the United States Geological Survey, Book 2, Chapter D1, 116p.