

폐기물 매립지 주변지역에서의 환경오염에 관한 지구화학 및 지구물리학적 연구

김경웅, 손호웅
배재대학교 국제자원개발학과

A Geochemical and Geophysical Study on the Environmental Contamination in the Vicinity of Waste Disposal Site

Kyoung-Woong Kim, Ho-Woong Shon
Department of International Resources Development, PaiChai University

대전시 신대동 일반 폐기물 매립지역 주변토양의 Cu, Pb와 Zn 함량은 대부분이 우리나라 토양내의 평균 함량보다는 높은 것으로 나타났으나 농작물을 통하여 인류 및 동물에 해를 끼칠수 있는 정도는 아닌 것으로 나타났다. 지하수의 경우 Cu, Pb와 Zn이 검출되지는 않았고, F, Cl, NO₂, NO₃ 및 SO₄ 함량도 음용수 수질기준보다 낮은 것으로 나타났다. 그러나 매립지 인근 D지역에서의 지하수의 pH가 5.58로 나타나 음용수로는 부적합 것으로 판명되었다. 전기 비저항 탐사를 행한 결과 토양오염이 진행된 지역에 함수층이 존재하고 있었으며 침출수의 배출에 의한 오염체의 이동에 의해 전기 비저항값이 더욱 낮게 나타났다. Gradiometer를 이용한 자력탐사 결과 전기비저항값이 낮은 오염지역에서 자력치와 그 미분값의 이상치가 나타났으며, 그 지점 지하수의 원소함량이 다른지역보다 높았다.

In the vicinity of the Sindae-dong waste disposal site in Taejeon, the average Cu, Pb and Zn concentrations in soils are higher than those in other Korean soils but these are not high enough to cause any harmful effect to human and animal through the crop plants. Copper, Pb and Zn are not detected in the groundwater samples and F, Cl, NO₂, NO₃ and SO₄ concentrations in groundwater samples are lower than drinking water standards. However, the pH of groundwater sample in site D is 5.58 which is not suitable for the drinking water. 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 results from the magnetic survey method, the anomalous values of the total geomagnetic fields and their gradients are found in the sampling site of low resistivity and high trace element concentrations.

Key words : waste disposal site, contaminated soil, groundwater, electric resistivity, magnetic survey method

서론

급격한 도시팽창과 발전으로 일일 약 200만톤 이상의 일반폐기물이 배출되고 있는 대전시에서

는 이의 위생적이고 효율적인 최종처분을 위하여 대덕구 신대동에 총 71,000평의 장기위생매립장을 조성하여 매립중이다(대전직할시, 1991).

수질오염원으로서의 중금속은 풍화에 의한 자연적인 근원과 인류의 여러가지 산업활동에 의

해 기인하며, 특히 도시 쓰레기나 고체 폐기물 처리장의 침출수는 각종 중금속의 주요한 근원이 된다(Adriano, 1986). 이는 버려진 쓰레기에 함유된 유기물이 분해되면서 혐기성 상태가 될 때 중금속을 용출시킬 수 있기 때문이다(Daniel, 1993), 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 매립장 부근에서 심한 오염사례가 지적되고 있다(Wadleigh, 1968).

대전시는 신대동에 일반 폐기물매립지를 조성할 당시 지역주민들에게 수도를 설치해 주어 지하수의 사용을 금지해 왔으나 아직도 농작물 재배등의 여러가지 용도로 지하수를 사용하고 있다. 폐기물 매립지로 부터의 침출수의 유출은 지하수오염을 유발하고, 이때 생성된 지하수 오염체는 토양을 통하여 이동되어 근접한 거리에 있는 갑천으로 유입되어 지표수오염을 발생시킬 가능성이 있어 이러한 갑천의 오염은 결과적으로 중부권의 식수원인 금강을 오염시킬 수 있다. 따라서 매립지 부근지역에서의 오염문제를 과학적으로 대처하기 위해서는 지구화학적인 방법에 의해 매립지 주변지역에서의 토양 및 지하수 오염

정도를 파악하고 전기 비저항 탐사와 자력탐사에 의한 지구물리화학적 방법으로 침출수에 의한 지하수의 오염범위와 이동방향을 추적하고자 한다

지형 및 지질

신대동 매립지는 북위 $36^{\circ} 23' 30''$ 에 위치하며 대전의 중북부지역으로 갑천과 유등천의 합류지점의 북부에 인접하고 있으며 (Fig. 1), 해발 50-150m의 평탄지로서 경사도 5° 이하의 평지가 절반이상을 차지하고 있다(대전직할시, 1991). 이 지역의 거의 대부분을 차지하는 암석은 백악기의 편상화강암과 그후에 관입한 북운모화강암이다. 이 두종류의 화강암은 심한 풍화에 의하여 구릉화되어 있으며, 곳에 따라서는 층적층과의 경계마저도 구분이 힘들 정도로 경사가 완만해져 매립장과 갑천사이에는 층적층의 평탄지가 발달되었다(박희인의, 1977).

편상화강암의 신선하고 치밀한 암석에는 지하수개발이 거의 불가능하나 편리의 발달에 따라 약간의 지하수를 기대할 수 있으며, 대체로 100m 심도에서 정당 100m³/day 내외의 지하수를 기대할 수 있는 것으로 보고되었다(임정웅의, 1982).

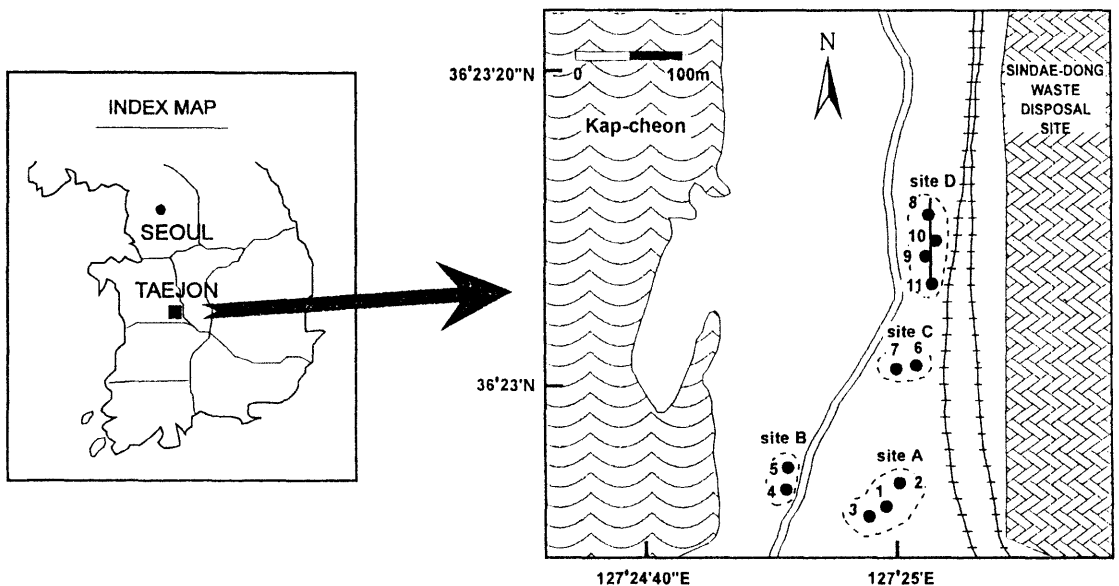


Fig. 1 Sampling locations in the Sindae-dong waste disposal site, Taejon.
(solid line in site D: electric resistivity and magnetic survey line)

실험 및 방법

결과 및 고찰

지하수 시료는 매립지 서쪽 주변지역의 4지점에서 펌프로 끌어올려지는 지하수를 채취하였다. 따라서 이 연구에서 언급하는 지하수는 자유면대수층조건의 지하수이다. 시료채취시 지하수를 10분이상 흘러 보낸 후에 채취하였으며, 각각의 시료마다 양이온 분석용시료와 음이온 분석용시료를 구분하여 채취하였고, 양이온 분석용 시료에는 질산을 가하여 pH(수소이온농도)를 1 이하로 조정하였다. 모든 시료에는 0.45 μm Nitro-cellulose Membrane Filter를 이용하여 부유물질을 제거하였으며, pH는 현장에서 pH meter로 측정하였다. 한편 매립지주변지역 지하수시료의 오염도를 비교하기 위하여 오염원의 영향을 받지 않은것으로 생각되어지는 비교시료를 대전소재 배재대학교 뒷산 4곳의 약수터에서 채취하여 함께 원자흡광분석법(Atomic Absorption Spectrometry)으로 Cu, Pb, Zn의 양이온과 이온 크로마토그래피법(Ion Chromatography)으로 F, Cl, NO₂, NO₃, SO₄의 음이온을 분석하였다.

토양은 표토(0-15 cm 깊이)와 심토(15-30 cm 깊이) 시료로 구성되었으며, 채취후 자연광에서와 전기오븐에서 40°C로 건조시켰다. 그 중 약 50g 정도의 시료를 4분법에 의하여 취한후, -80mesh (180 μm) 까지 분쇄한후 시료봉투에 넣어 봉하였다. 하나의 표토시료는 2 X 2 meter의 격자위에서 채취한 9개의 부시료로 구성되었으며, 심토는 적어도 3개의 부시료를 가진다. 토양시료는 질산/과염소산으로 처리한후에(Thompson and Wood, 1982), 원자흡광분석법 (Atomic Absorption Spectrometry)으로 Cu, Pb, Zn 등의 중금속원소를 측정하였다. 모든 분석결과는 Quality control system을 이용하여 평가된후 사용되어졌다(Ramsey et al., 1987).

한편 연구지역의 지하오염체 이동을 관찰하기 위한 전기비저항 탐사는 Wenner전극 배열법을 사용하여 (Telford et al., 1990) 1994년 6월에 각 pole에서 수직탐사를 실시하였으며 pole간격은 3m로 하였다. 1995년 6월에는 전기비저항 탐사와 EG&G사의 Proton Magnetometer를 사용하여 자력탐사를 병행하였다.

1. 오염지역 선정을 위한 토양중의 Cu, Pb, Zn함량 조사

매립지 주변지역의 토양은 Cu와 Pb가 양의 상관관계를 보이며(김경웅과 손호웅, 1994), 대부분의 시료가 우리나라 토양내의 평균 함량인 5.0 $\mu\text{g/g}$ Cu, 8.2 $\mu\text{g/g}$ Pb 와 8.0 $\mu\text{g/g}$ Zn (장원, 1990) 보다는 다소 높으나(Table 1), 토양중의 중금속 원소 함량의 최대 배경값인 100 $\mu\text{g/g}$ Cu, 100 $\mu\text{g/g}$ Pb 와 300 $\mu\text{g/g}$ Zn 보다는 낮은 것으로 나타났다(Kloke, 1979).

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
	Avg.	9.5	8.3	17.9	19.9	80.1	78.5
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
	Avg.	6.3	8.2	15.5	19.4	68.7	60.2
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
	Avg.	17.8	9.9	28.6	26.5	75.8	68.2
D	8	9.6	7.6	16.8	3.6	67.2	59.6
	9	3.6	44.4	12.4	36.0	118	1,240
	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
	Avg.	7.9	15.8	17.2	15.3	83.2	354

신대동 매립지 주변지역의 표토(0-15cm 깊이)와 심토(15-30cm 깊이) 내의 Cu, Pb 와 Zn함량은 매립지와 인접한 C지역과 D지역 토양내 평균함량이 매립지와 비교적 멀리 떨어진 B지역보다는 높은 것으로 나타났다(Tabel 1). D지역의 표토와 심토에서 평균 Cu함량은 7.9 $\mu\text{g/g}$ 과 15.8 $\mu\text{g/g}$ 으로 토양내의 평균함량 12 $\mu\text{g/g}$ 과 유사한 결과를 보였으며 (Berrow and Reaves, 1984), 우리나라 토양내 Cu 허용치인 125 $\mu\text{g/g}$

을 훨씬 밑도는 것으로 나타났다(환경처, 1977). Pb의 경우 C지역에서의 표토와 심토내의 평균 함량이 28.6 $\mu\text{g/g}$ 과 26.5 $\mu\text{g/g}$ 으로 미국 전역에 걸친 토양중 Pb 평균 함량 19 $\mu\text{g/g}$ 보다는 약간 높았으며 (Shacklette and Boerngen, 1984), Zn의 경우 D지역에서의 표토와 심토내의 평균 함량 (83.2 $\mu\text{g/g}$, 354 $\mu\text{g/g}$)이 가장 높았다. 특히 D 지역 9번 심토의 경우 Zn 함량 이외에도 Cu 와 Pb함량이 높은 것으로 나타나 이 지점을 중심으로 한 지하수시료의 분석과 오염체 추적을 위한 지구물리학적 연구가 필요하였다.

Table 2. Trace element concentrations(mg/l) and pH in groundwater and leachate

site	I.D.	F	Cl	NO ₂	NO ₃	SO ₄	Cu	Pb	Zn	pH
A	GW1	0.38	17.7	-	29.6	6.0	n.d.	n.d.	0.34	6.42
C	GW2	-	-	-	-	-	n.d.	n.d.	0.20	6.37
D	GW3	0.55	14.4	0.33	14.4	16.5	n.d.	n.d.	n.d.	5.58
D	GW4	0.27	17.5	0.48	20.9	4.5	n.d.	n.d.	n.d.	6.10
Leachate 1'		5.19	1897	n.d.	11.6	25.0	0.02	n.d.	0.11	8.38
Leachate 2'		-	2077	-	8.2	108	0.04	0.02	0.44	8.38
Fresh water		-	-	-	-	-	n.d.	n.d.	n.d.	6.12

* Jung (1995)

2. 지하수중의 미량원소함량과 pH

Table 2 에 나타난 것과 같이 조사지역 지하수의 경우 Cu, Pb 와 Zn 함량이 음용수 수질 기준인 1 mg/l Cu, 0.1 mg/l Pb 와 1 mg/l Zn을 넘지 않는 것으로 나타났다 (보건사회부, 1966). 또한 음이온의 경우도 국내 음용수 수질기준인 1 mg/l F, 150 mg/l Cl, 50 mg/l NO₃, 250 mg/l SO₄ 보다 낮은 것으로 나타났으나 (보건사회부, 1966), D지역중 9번 토양시료에 가깝게 위치한 지하수 GW3의 수소이온농도 (pH)가 음용수 수질기준인 5.8-8.5 보다 낮은 5.58로 나타나 음료수로의 사용에 부적합한 것으로 판명되었다. 또한 NO₃로 환산한 질산성 질소의 농도가 WHO에서 제시한 음용수 기준치 50 mg/l 보다는 낮으나 (WHO, 1971), 난지도와 부산 석대지역의 폐기물 매립장의 침출수보다도 높아(정상용, 1995), 일반 폐기물 매립에 의해 나타나는 침출수의 영향을 보여준다(Purves and MacKenzie, 1973). NO₃의 함량은 시간이 경과함에 따라 그 함량이 계속적으로 증가하는 경향을 보여 앞으로도 지속적인 감시가 필요하다(Fig. 2). 따라서 D지역에 나타

난 토양 및 지하수 오염의 원인을 밝혀내기 위하여 전기비저항 탐사와 자력탐사를 수행하였다.

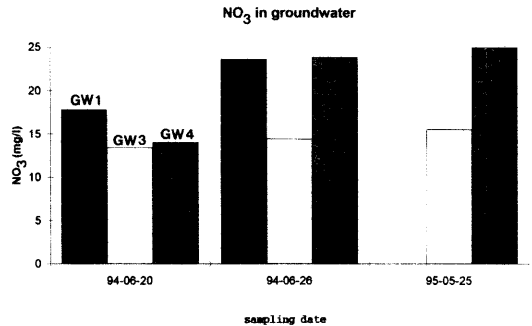


Fig. 2 Variation of NO₃ concentrations in groundwater samples(mg/l)

3. 오염체 추적을 위한 전기비저항 탐사 및 자력탐사

연구지역의 오염체 추적을 위하여 1995년 6월에 오염지역인 D지역에서 전기탐사를 실시하였으며, Wenner 전기전극 배열방법을 사용하여 각 pole 위치에서 수직탐사를 실시하였다. Fig. 3은 D지역의 전기 비저항 탐사 결과인 외견 비저항치의 2차원 단면도로 기준점에서 10-15 m 떨어진 심도가 1-2m 되는 곳에 외견비저항치가 낮은 물체가 존재함을 보여주고 있다. 이는 오염도가 매우 높은 지하수임을 보여주는 것으로 침출수나 염수에 의하여 오염된 지하수는 이에 의해 오염되지 않은 지하수에 비하여 전기전도도가 상당히 낮은 전기비저항치를 보이게된다(Zhody et al., 1974). 이는 오염된 지하수에 많은 전해물질이 포함되어 있기 때문이다. 한편 위의 결과를 1994년 6월의 탐사결과와 비교하여 볼때 (김경웅 과 손호웅, 1994), 외견비저항치가 낮아진 것으로 판명되어 1994년의 탐사이후 침출수의 지속적인 누출로 지하수가 오염되었음을 알수있다.

자력탐사에서는 두개의 sensor를 Fig. 4 와 같이 배열한 Gradiometer를 사용하면 지표에서의 주변 물체와 태양등에 의한 자기일변화가 두개의 sensor에 동시에 영향을 미치므로 두 sensor의 측정치의 차는 지하의 영향으로 간주할수 있게 하였다. Fig. 5 의 (a)는 두 sensor의 각 측정에서의 자력치 (Total Geomagnetic Field)를 보여주고 있으며, (b)와 (c)는 이 값의 수직, 수평 미분값을 보여주고 있다. (b)와 (c)에서의 변화율에서 보면 기준점에서 양 5-15m 떨어진 곳에서 이상치가 존재함을 볼수 있으며, 이는 이 위치

중금속의 오염도가 높은 침출수의 존재를 의미한다. 이 결과는 Fig. 3 의 외전비저항치 결과와도 일치함을 보이며 이곳에 인접한 곳의 지하수 시료 GW3과 GW4에서 원소함량이 가장 높아 자력탐사가 환경오염체의 확산추적에 적용될수 있음을 보여주고 있다.

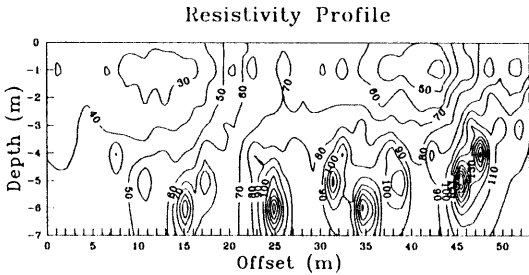


Fig. 3 Apparent resistivity section (unit: $\Omega \cdot m$) and heavy metal concentrations along profile in D site (pole interval: 3m)

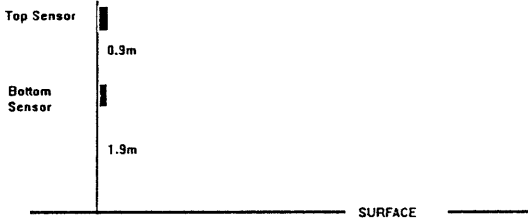


Fig. 4 Schematic diagrams of top sensor and bottom sensor in gradiometer

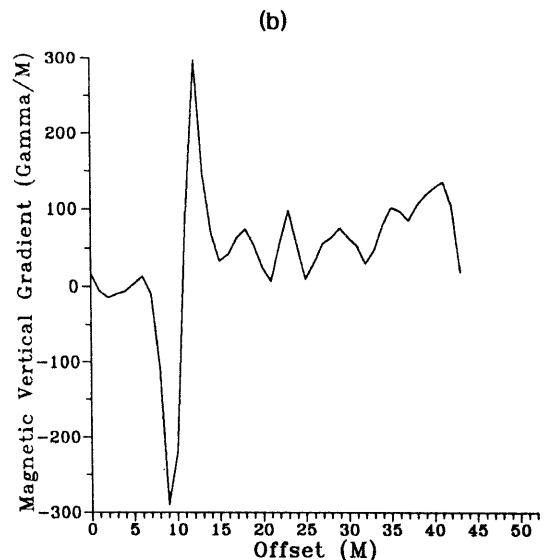
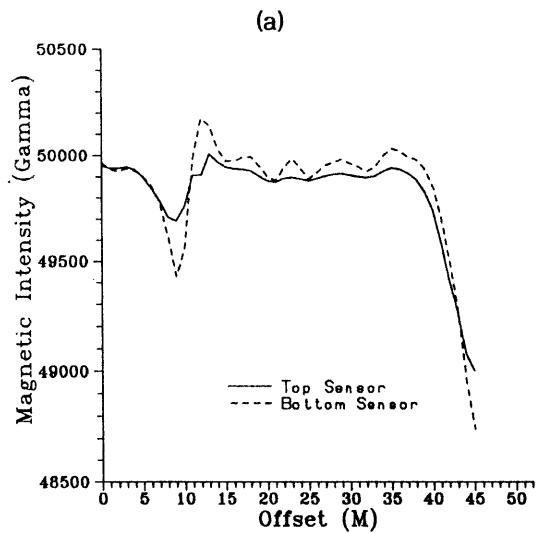
결론

1) 대전시 신대동 일반 폐기물 매립지역 주변토양의 Cu, Pb와 Zn 함량은 대부분이 우리나라 토양내의 평균 함량보다는 약간 높은 것으로 나타났으나 농작물을 통하여 인류에 해를 끼칠수 있는 정도는 아닌 것으로 나타났다. 특히 매립지역과 인접한 지역의 심토에서 Zn 함량이 높은 것으로 나타나 오염체의 지하이동에 의한 영향임을 보여준다.

2) 지하수의 경우 Cu, Pb와 Zn이 검출되지는 않았으나 매립지와 인접한 지역의 특정 시료의 pH가 5.58로 나타나 음용수로서 부적합한 것으로 판명되었다. 또한 NO_3^- 의 함량이 다소 높은것으

로 나타났으며 시간이 경과함에 따라 그 함량이 계속적으로 증가하는 경향을 보였다.

3) 오염지역의 원인을 알아보기 위하여 전기비저항 탐사를 행한 결과 토양오염이 진행된 지역에 함수층이 존재하고 있었으며 침출수의 배출에 의한 오염체의 이동에 의해 전기 비저항값이 더욱 낮게 나타나고 있었다. Gradiometer를 이용한 자력탐사 결과 전기비저항값이 낮은 오염지역에서 자력치와 그 미분값의 이상치가 나타났으며, 그 결과는 지하수 분석결과와도 일치하였다.



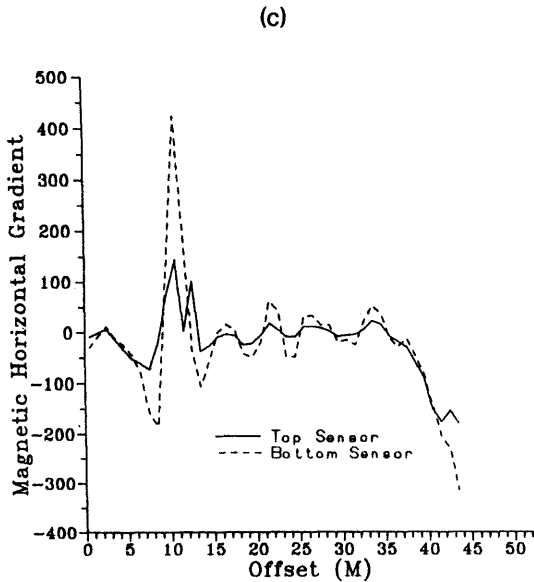


Fig. 5 Total geomagnetic fields (unit: gamma) and their gradients along profile in D site

사 사

본 논문의 화학분석을 위하여 기기사용을 허락하여 주신 서울대학교 자원공학과와 전효택교수와 자원연구소의 지구화학실 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김경웅, 손호웅(1994) 대전시 신대동 폐기물 매립지 주변지역에서의 지하수 및 토양의 중금속오염, 지하수환경학회지, v.1, p.85-89.
2. 대전직할시(1991) 대전직할시 쓰레기 장기위생 매립장 조성사업 타당성 조사보고서, 대전직할시, 370p.
3. 보건사회부(1966) 음용수 수질기준.
4. 박희인, 이준동, 정지곤(1977) 한국지질도: 유성도폭, 21p.
5. 임정웅, 이동영, 김영화, 박동극, 임창은(1982) 수리지질도 설명서: 대전 북부 (갑천유역), 한국 동력자원연구소, 50p.
6. 장원 (1990) 오염예상지역과 비오염예상지역에서의 토양, 곡물내 중금속 함유량에 관한 연구. 서울대학교 환경대학원, 16p.
7. 정상용 (1995) 난지도 매립지와 부산 석대 매

- 립지의 침출수 분석자료 (미발표)
8. 환경처(1977) 환경보전법 시행규칙.
 9. Adriano, D.C. (1986) Trace Elements in the Terrestrial Environment, New York, Springer Verlag. 533p.
 10. Berrow, M.L. and Reaves, G.A.(1984) Background levels of trace elements in soils, Proc. Int. Conf. Environ. Contamination, p.333-340.
 11. Daniel, D.E. (1993) Geotechnical Practice for Waste Disposal, New York, Chapman & Hall, 683p.
 12. Kloke, A. (1979) Contents of arsenic, cadmium, chromium, fluorine, lead, mercury and nickel in plants grown on contaminated soil, UN-ECE Symposium.
 13. McGuinness, C.L. (1983) Ground water, in Tank, R.W., Ed., Environmental Geology, p.433-443.
 14. Purves, D. and MacKenzie, E.J.(1973) Effects of applications of municipal compost on uptake of copper, zinc and boron by garden vegetables, Plant and Soil, v.39, p.361-371.
 15. 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.
 16. 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.
 17. Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E. (1990) Applied Geophysics (2nd ed.), Cambridge, Cambridge Univ. Press, 770p.
 18. Thompson, M. and Wood, S. (1982) Atomic absorption methods in applied geochemistry, in Cattle, E.J., Ed., Atomic Absorption Spectrometry, p.261-284.
 19. Wadleigh, C.H. (1968) Wastes in relation to agriculture and forestry. Misc. Pub. No. 1065, U.S. Dept. Agr., Washington, D.C., 112p.
 20. WHO (1971) International standards for drinking water.
 21. 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.