

쓰레기 매립지 침출수 거동 예측평가 연구

정종관, 장 원*

배달환경연구소

*대전대학교 환경공학과

A Study on the Transfer Prediction of Landfill Leachate

Jong-Gwan Jung, Won Jang*

Director, Korean Institute for a Sustainable Society

*Professor, Dept. of Env. Eng., Taejon University

Abstract

For the purpose of saving the waste disposal cost a self-governing community on the whole reclamates the wetland and uses it as a landfill site. During the operation period of site, the environmental impact by the leachate is usually neglected. Therefore, to predict the environmental impact and dispersion of leachate, the wetland adjacent to the South Han River in Chungju is selected as a site of case study.

The main content of this article is to apply the simulation model CONMIG to leachate transfer in the ground water and to derive the impact by the leachate. A kind of non-reacting conservative material, chloride ion is used as a tracer to quantify impacts by the leachate.

keywords : landfill, leachate, transfer, environmental impact, ground water

I. 서 론

우리나라의 쓰레기 처리과정을 보면 발생, 수집, 운반, 최종처분에 이르기까지 적절한 환경오염 방지시설 없이 공터, 저습지 등 토지 이용도가 낮은 곳에 매립방식으로 쓰레기를 처리해 왔다. 따라서 쓰레기 매립지의 입지선정 과정이나 매립지 조성공사시 해당 지역 주민들의 환경질

의 하락에 대한 상실감과 재산가치 하락에 따른 상대적 박탈감 때문에 반대가 심하여 매립지 확보 및 설치가 어려워지고 있다.⁹⁾ 매립지에 의한 환경오염 중에서 쓰레기 층으로의 빗물 유입과 쓰레기의 분해 안정화에 의해 발생하는 침출수는 매립지 주변의 지하수나 하천수에 대한 지속적인 오염원으로 작용하고 있다.⁹⁾

본 연구는 재정자립도가 낮은 지방자치단체에서 쓰레기

처리비용을 줄이기 위해 강변의 소택지를 매립한 다음 매립지를 조성하여 사용할 경우 쓰레기 침출수에 의한 영향을 예측평가하기 위하여 시도되었다.

연구대상 지역으로는 남한강변에 위치한 충주시 능암호 주변 저습지를 선정하였으며, 매립지에서 발생한 침출수내의 비반응성 물질인 염소이온의 거동을 연구함으로써 매립지의 침출수가 하천수에 미치는 오염의 영향을 정량화하는 것을 주요 내용으로 한다.

II. 연구내용 및 방법

매립지의 침출수는 수문학적 물수지 관점에서 폐기물 충내로 침투되는 침투량에 의해 결정되며, 침출수의 특성은 침투수와 폐기물총의 상호 반응에 의해 매립경과 년도에 따라 농도가 변하게 된다. 연구대상 지역으로 충주시 남한강변의 저습지인 능암호와 그 주변의 폐하천부지를 설정하여 침출수의 거동 및 확산 영향을 예측하도록 한다.

매립에 따른 침출수 발생과 수질오염 정도를 파악, 예측하기 위해 용질이동은 물질수지와 분산에 관한 Fick의 법칙으로부터 구한다. 균질한 등방성 대수층의 정상류에서 비반응성 용질의 2차원 방정식은 다음과 같다.⁸⁾

$$\frac{\partial(bC)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X_i} [bD_{ij} \frac{\partial C}{\partial X_j}] - \frac{\partial}{\partial X_i} (bCV_i) \pm C'W$$

C : 용질의 농도 (M/L^3)

D_{ij} : 수리분산계수 (L^2/T)

b : 포화 대수층의 두께(L)

C' : source-sink에서 용존화합물의 농도 (M/L^3)

V_i : X_i 방향의 유속 (L/T)

W : 단위면적 단위시간당 유입되는 부피 (L^3/TL^3)

오염물의 이동을 표현하는 식은 위 식을 기초로 하여

다양한 형태로 변형되는데, 가장 일반적으로 사용되는 모형은 매립지를 몇 개의 격자(grid)로 분할된 점오염원으로 간주하고 시·공간적으로 오염물의 이동 분산정도를 예측하는 모형인 CONMIG(CONTaminant MIGration)이다.

이 모형은 2차원 오염물질 이동을 모의(simulation)할 때 대수층과 침출수 용질의 조건을 단순화하여 오염물질의 이동 확산을 예측한다. CONMIG은 점오염원을 연속오염원과 순간오염원(slug point source)으로 구분하는데 쓰레기 매립지는 침출수에 의한 오염물질의 유출이 장기간 계속되므로 연속 점오염원으로 분류하고 있다.¹⁸⁾

모형을 적용시키는데 필요한 입력자료^{1),10)}는 대수층의 공극률 및 두께, 수리전도도, 종분산지수, 횡분산지수, 공극유속, 지하수의 흐름방향, 오염원에서 오염물질의 종류 및 농도, 지연지수 등이다.

이때 사용되는 입력자료의 내용은 다음과 같다.

1. 대수층의 공극률

본 조사 대상지역의 지층의 지질구조는 지표면으로부터 층적층, 풍화대, 기반암의 순으로 단순한 지질상태로 되어 있다. 대수층의 공극률은 정밀하게 측정하기 위해서는 현장에서 시료를 교란시키지 않은 상태로 측정해야 한다. 그 이유는 일단 시료가 교란되면 입자 사이의 배열상태가 변화하여 공극률이 달라지기 때문이다. 그러나 배열상태를 변화시키면서 공극률을 측정해 본 결과 시료의 조성이 세립질 모래인 경우 그 차이는 매우 작았다. 본 조사에서는 현장에서 시료를 채취하여 일정량의 시료를 넣은 메스실린더에 일정량의 물을 넣어 공극을 채운 후 체적변화를 측정하였다.

$$\text{공극률}(n) = \frac{(물+시료)-(물이 시료를 채웠을 때 체적)}{(물+시료)}$$

측정된 공극률은 0.40이며 대수층의 구성입자와 지하수에 작용하는 분자력이나 표면장치에 의해 공극내에 그대로 남아 있는 물의 체적을 제외한 공극을 유효공극률이라

하는데 그 크기는 실제 공극률보다 작다.¹²⁾ 따라서 본 조사에서는 유효공극률을 실제의 75% 선인 0.30으로 추정하였다.

2. 대수층의 두께 및 구성

기반암을 제외한 대수층(帶水層)의 두께를 알기 위해 현장의 지질주상도(地質柱狀圖)를 참고하였다(Figure 1).

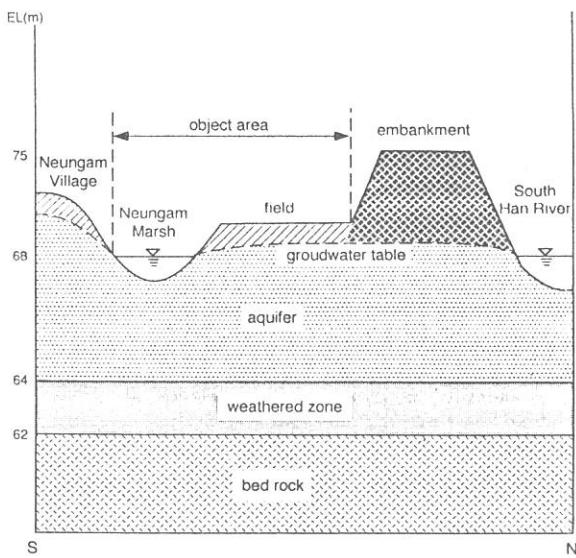


Figure 1. Geological section.

표토층을 제외한 사력층으로 구성된 주대수층의 두께는 평균 4.2m이며 풍화대의 두께는 평균 1.5m 정도로 추산된다. 따라서 전체적인 대수층의 두께는 5.7m 정도로 간주할 수 있다.

3. 수리전도도

수리전도도(水理傳導度)는 모형의 작동에 직접 필요한 변수는 아니지만 지하수의 공극유속을 계산하기 위해 필요하다.

측정방법은 간이 시험법으로 현장에서 시험 우물에 일정량의 물을 주입한 후 상승한 수위가 시간에 따라 하강하는 하강률을 반대수그래프(half-log graph)에 그려 이를

기준의 표준 그래프와 비교하여 추정하는 순간시험 방법이 있으나 측정의 어려움 때문에 오차가 크다.

한편 대수층의 두께 및 조성에서 수리전도도를 계산하는 방법도 있지만 현장성이 떨어지는 단점이 있으므로, 1987년도에 농어촌진흥공사에서 남한강유역 수백도(水脈圖)조사사 기측정 산출된 수리전도도 자료를 사용하였다.^{2), 6)}

당시 지하수위 1.25m~1.82m에 해당하는 세립질 모래층 충적층의 수리전도도 K의 대당값은 $1.16 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ 로 사용하였다.

4. 동수구배

지하수 흐름 방향을 알기 위해서는 동수구배(動水勾配)를 알아야 하는데 동수구배는 지하수위 등고선도를 작성한 후 유선망(流線網) 분석을 통하여 구할 수 있다.¹³⁾

지하수위는 고정된 것이 아니고 계절에 따라 변동이 있으며 특히 장마와 가뭄 사이에 수위차는 상당히 크다. 대상 지역은 능암호와 조정지 댐 사이에 위치해 있는 세립질 모래층 충적토로서 매립사업 시행시 능암호와 그 주변지역을 편평화한 다음 매립지를 조성할 것으로 지하수의 흐름은 지표수의 흐름에 영향을 받게 될 것으로 생각된다.

따라서 동수구배는 지표의 등고선도와 지하수위 차로 구하게 되는데, 수위차 7m를 능암호을 진입로에서 능암호간 거리 175m로 나누면 동수구배 값(dh/dl)은 0.04 정도에 해당한다.

5. 공극유속

공극유속(空隙流速)은 수리전도도에 동수구배를 곱한 다아시안 선속도(Darcian velocity)를 유효공극률로 나눈 값이다. 앞에서 유효공극률 0.30, 수리전도도 $1.16 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$, 동수구배는 0.04이므로 공극유속은 $1.55 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 이다.

6. 분산지수

대수층의 종분산지수(縱分散指數)는 현장에서의 추적자

실험이나 실험실에서의 토질 주상실험으로 구할 수 있다. 그런데 실험실 값과 현장에서 구한 종분산지수의 값은 차이가 크며 그 둘 사이에 일반적인 관계식이 존재하는 것은 아니다. 따라서 이 모형에서는 Fried가 주장한 국지규모의 종분산지수 5m를 사용하였고, 횡분산지수는 보통 종분산지수의 1/5정도의 크기를 가지므로 그 값은 1m로 하여 적용시켰다.¹⁴⁾

7. 침출수 발생

매립지에서 발생하는 침출수는 수문학적 물의 순환에 의해 매립지 내에 들어오는 유입수량과 흘러 나가는 유출수량과의 물수지 평형 관계식으로부터 산출된다.¹⁵⁾ 침출수 발생의 직접적 원인은 강수량이며 표면유출량, 증발산량 등은 침출수의 발생량을 줄이게 되며 그 밖에 토양의 수분 저장능력, 지하수위도, 침출수 발생량에 영향을 준다. 침출수량을 산정하기 위해 다음과 같은 합리식을 적용시킬 수 있다.¹⁷⁾

$$Q = 1/1000 \cdot C \cdot I \cdot A$$

Q : 침출수량 (m^3/day)

C : 침출계수

I : 연간 일평균 강우량(mm/day)

A : 매립면적(m^2)

위 식에서 침출계수 C의 값은 매립지 복토의 질 및 매립되는 폐기물의 종류, 매립시기 등에 따라서 0.2~0.8 범위에 있으며, 일반적으로 강수량의 25% 정도를 침출수량 예측치로 보아도 무방할 것으로 판단된다.⁷⁾

침출수량 예측치를 구하기 위해 매립지 면적은 대상 지역 $83,125 m^2$ 로 잡고, 충주시의 지난 30년간(1961~90) 연 평균 강수량은 $1162.2 mm^{11)}$ 로, 침출계수는 0.25로 하여 계산하면 침출수량은 $66.17 m^3/day$ 로 추정된다.

침출수의 시간에 따른 확산정도를 알아보기 위해 비반응성 보존물질인 Cl^- 을 이용하였는데, 침출수중 Cl^- 은 생

Table 1. Input Data

contents	value of characteristics
effective porosity	0.30
thickness of aquifer	5.7m (18.7 ft)
hydraulic conductivity	$1.16 \times 10^{-2} cm/sec$
ground water hydraulic gradient	0.04
flow velocity in porous	$1.55 \times 10^{-3} cm/sec$ (4.4 ft/d)
vertical dispersion coefficient	5m (16.4 ft)
horizontal dispersion coefficient	1m (3.3 ft)
quantity of leachate	$66.17 m^3/d$ (17,489 gal/d)
concentration of chloride ion	500 mg/L

물화학적 작용에 의한 반응이 거의 없는 지표로서 매립지 침출수의 주변지역 오염정도, 범위와 오염물의 이동방향을 추적할 수 있는 자연적인 추적자(tracer)로 가장 대표적으로 사용되고 있다.¹⁹⁾ Cl^- 농도는 일반적인 도시 쓰레기 매립지에서 발생되는 침출수의 농도 $100\sim 3,000 mg/L$ 중 대표값인 $500mg/L$ 를 적용시켰다.

CONMIG의 작동에 필요한 입력자료를 정리해 보면 Table 1과 같다.

III. 연구 결과 및 고찰

1. 매립초기

매립초기의 지하수내 오염물질 등농도곡선을 보면 대상 지역 가운데 부분을 정점으로 하여 주변지역에 확산되는 것을 알 수 있다. 오염된 지하수는 남한강에도 영향을 미쳐 하류로 갈수록 농도가 증가하게 된다. 이 때 매립지내 지하수는 침출수의 농도가 $500mg/L$ 라고 할 때 최고 $64.2 mg/L$ 의 농도를 나타낸다. 그리고 시간이 지남에 따라 쓰레기의 분해에 따른 지하수내 오염물질의 농도는 증가한다. 매립초기의 등농도곡선은 Figure 2이며, 1년 후의 등농도곡선은 Figure 3과 같다.

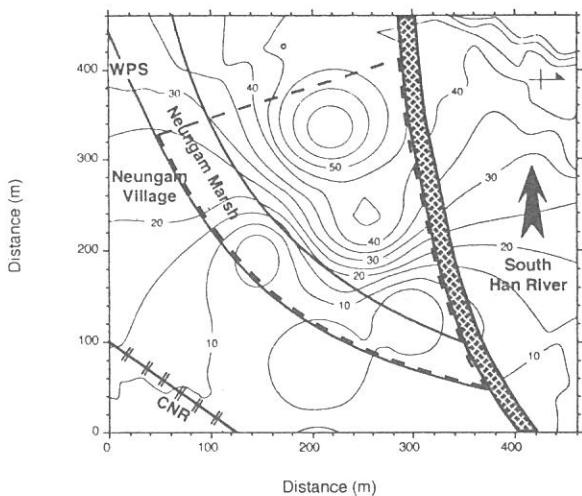


Figure 2. Leachate concentration distribution contour map of Cl^- after 6 months of landfilling. Chungbuk National Railroad and water pumping station are abbreviated to CNR and WPS, respectively. Patch represents embankment.

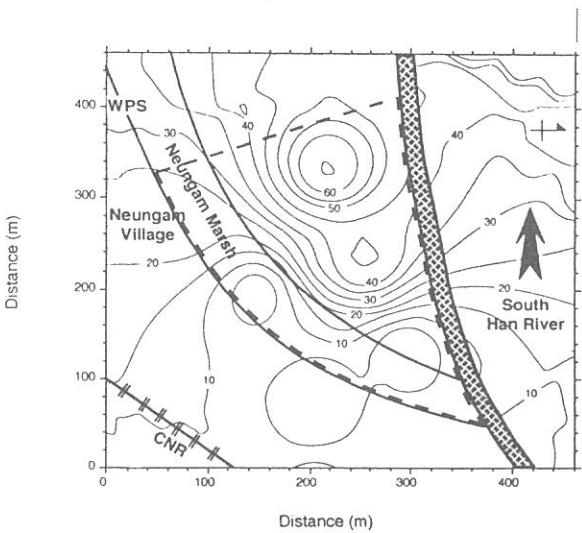


Figure 3. Leachate concentration distribution contour map of Cl^- after 1 year of landfilling. Chungbuk National Railroad and water pumping station are abbreviated to CNR and WPS, respectively. Patch represents embankment.

2. 매립 2년후

오염물질 등농도곡선의 모양은 매립초기와 형태는 같지만 침출수의 농도는 가장 높은 상태를 유지하게 된다. 침출수의 농도가 500mg/L 일 때 지하수의 농도는 최고 92.6mg/L 를 나타내며, 이 농도는 쓰레기 매립지가 연속 오염원이므로 매립된 쓰레기가 분해되어 안정화 될 때까지 계속 유지된다(Figure 4).

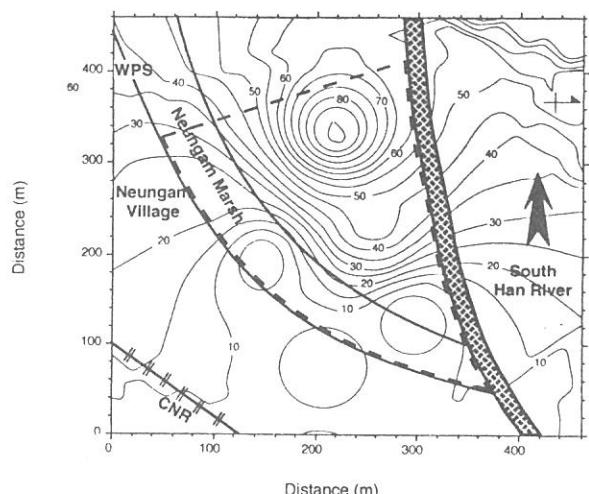


Figure 4. Leachate concentration distribution contour map of Cl^- after 2 years stage of landfilling. Chungbuk National Railroad and water pumping station are abbreviated to CNR and WPS, respectively. Patch represents embankment.

그리고 능암호를 매립한 다음 쓰레기를 최종매립하게 되므로 오염물질은 횡방향으로도 비교적 널리 확산되어 남한강 수질에도 지속적으로 커다란 영향을 미친다.

3. 침출수의 농도가 높은 경우

초기 침출수의 농도를 전형적인 대표치보다 다섯배 높은 상위값 $2,500\text{mg/L}$ 로 가정했을 때 등농도곡선의 모양은 500mg/L 일 때와 비슷하나 매립지내 지하수의 최고 농도는

33.27mg/L에 이르며, 인접한 제방밖으로 지하수가 확산되면 제방 경계면에서의 염소이온 농도가 최고 200~225mg/L 정도에 이르게 될 것으로 예측된다(Figure 5).

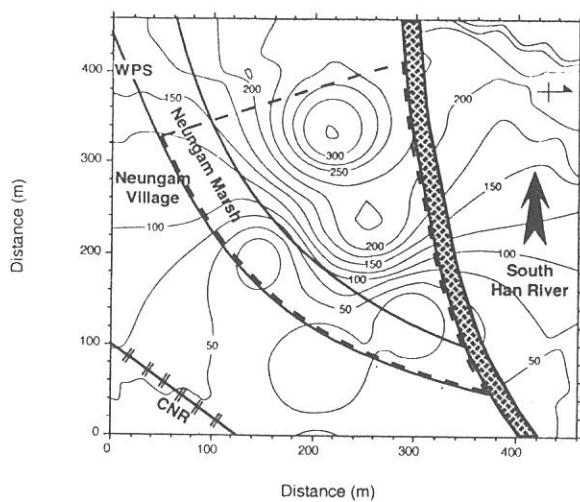


Figure 5. Leachate concentration distribution contour map of Cl^- after 1 year of landfilling (2500mg/l for initial leachate concentration of Cl^-). Chungbuk National Railroad and water pumping station are abbreviated to CNR and WPS, respectively. Patch represents embankment.

IV. 결 론

최근에 환경기초시설과 같은 기피시설의 입지에 대해 지역이기주의(님비)라는 현상이 발생되는 기저에는 명확한 입지선정 기준이 설정되어 있지 않은데다 처리비용 절감을 위해 비교적 쓸모없는 땅이라고 여겨져 왔던 저습지, 공한지 등에 손쉽게 매립해 온 전례 때문이라고 생각

된다.^{4),16)}

본 연구에서 능암호 지역에 쓰레기 매립지가 조성될 경우 침출수의 거동 및 환경영향을 예측하고 입지타당성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 쓰레기 매립지를 조성할 경우 지하수 및 지표수의 오염 확산 정도를 예측한 결과는 매립 2년후 부터는 침출수에 의한 지하수 오염이 최고 92.6mg/L에 이르게 되고 이러한 상태가 쓰레기가 안정될 때까지의 시기 즉, 최소한 20년간 지속될 것으로 예상된다.

그리고 만약 침출수의 농도가 현재보다 다섯배 정도의 상당히 높은 상태(2,500mg/L)로 유출된다면 매립 1년 후에도 지하수의 오염도는 최고 332.7mg/L에 이를 뿐만 아니라 지층구조상 지하수의 이동이 남한강 경계면에 이르게 되고 이에 따라 수질에도 상당한 영향을 줄 것으로 예측된다.

2. 입지선정시 매립지 확보와 운영상 경제성을 평가해야 되는데, 단지 시유지라는 점 때문에 사업비 경감 차원에서 대상지역을 선정한다면 앞부분의 연구결과 오염물질의 이동은 상당히 광범위하며 인근의 지하수 및 지표수를 오염 시킬 가능성은 더욱 커지게 된다. 그러나 이미 오염된 지하수의 정화작업은 미국의 Superfund^{주)} 사업에서 알 수 있듯이 엄청난 비용이 소요된다.²⁰⁾

따라서 입지의 경제성 평가는 사후에 막대한 비용을 투입하여 정화작업을 실시하는 것보다는 사전에 예방차원에서 고려되어야 할 것이다.

3. 능암호 수면을 매립하고 지반을 편평화한 다음 침출수 처리를 위해 차수막을 설치한다해도 지하수면이 높으

(註) Superfund : 자연보존 및 회수에 관한 법률(RCRA, 1976)에서는 환경상의 악영향을 저감시키지 못하는 매립장을 운영 중지시키기 위한 조항이 명문화되지 않았다. 따라서 유해폐기물 처분장이 주변환경에 미치는 문제에 대해 직접 매립지를 안정화시키거나 여기에 필요한 재정지원 수단을 제공하기 위한 법안이 새로 통과되었는데 이것이 종합적 환경복구 및 보상과 신뢰에 관한 법률(CERCLA, 1980)이다. 그런데 환경관리가 제대로 되지 않는 유해폐기물 매립지의 복구 및 환경영향 저감 비용은 워낙 많이 소요되므로 이를 Superfund 사업이라 부르기도 한다.

므로 차수막이 부유하는 등 시공상의 문제와 함께 쓰레기의 안정화가 늦어지는 문제가 발생하게 된다. 특히 대상 지역은 충적층 토양으로 투수성이 양호하므로 지하수오염 가능성이 크며 아울러 지표수질도 영향을 받게 되므로 매립지 위치로 적절하지 않다.⁵⁾ 지하수오염 방지를 위해서는 투수성이 불량한 화강암이나 퇴적암 등의 암반지역, 지반 침하가 없는 지역이 유리하다.

참 고 문 헌

1. 구자공, “난지도 침출수의 특성 및 거동”, 폐기물 재활용 국제심포지움, 중앙대학교 건설대학원, 1992. 5.
2. 김기완·이홍규, 지질도록설명서(충주), 국립지질조사소, 1965.
3. 김수생, 폐기물매립기술 및 침출수 처리, 한국폐기물학회, 1994. 7.
4. 김윤종, “쓰레기 매립장 부지선정을 위한 GIS 활용 연구”, 대한원격탐사학회지, 제6권 제2호, 1990.
5. 남궁완, 폐기물 매립지 입지선정 기준, 환경과학연구협의회, 1992. 2.
6. 박봉순·여상철, 지질도록설명서(목계), 국립지질조사소, 1971.
7. 배달환경연구소, [수도권매립지 종합환경조사 연구보고서], 1993. 3.
8. 이민호, “쓰레기 매립장에서의 지하수 오염물질의 이동예측에 관한 연구” 서울대학교 환경대학원, 1991. 2.
9. 이정전, “도시 폐기물의 매립기술”, 대한토목학회지 제39권 제5호, 1991. 10.
10. 최세영, “쓰레기 매립지의 침출수에 의한 지하수 오염에 관한 연구” 서울대학교 대학원, 1992. 2.
11. 충주시, 충주시 통계연보, 1994.
12. 한정상, 지하수개발과 관리대책, 세계 물의 날 심포지움, 한국수자원공사, 1995. 3.
13. 한정상, 지하수학개론, 박영사, 1983.
14. 한정상, 환경수리지질학, 신우문화사, 1988.
15. 환경처, 쓰레기 처리시설 구조지침 및 해설, 1991. 3.
16. 환경처, 환경영향평가서의 내실화를 위한 연구, 1993. 12.
17. 환경부, 환경영향평가연수, 1995.
18. Canter L.W. and Knox R.C., Groundwater Quality Protection, Lewis Publishers, 1988.
19. Freeze R.A. and Cherry J.A. Groundwater, Prentice-Hall, 1979.
20. Tchobanoglous, G. and Theisen, H. Integrated Solid Waste Management, McGraw-Hill, 1993.