

사용종료 비위생매립지 주변 지하수의 수질변화 특성

박정구^{1*} · 김태동¹ · 최동혁¹ · 이진용²

¹안동대학교 환경공학과, ²강원대학교 지질학과

Evaluation of Groundwater Quality Characteristics around Uncontrolled Closed Valley Landfill

Joung-Ku Park^{1*} · Tae-Dong Kim¹ · Dong Hyuk Choi¹ · Jin-Yong Lee²

¹Department of Environmental Engineering, Andong National University

²Department of Geology, Kangwon National University

ABSTRACT

This study evaluated groundwater quality around an uncontrolled landfill in W city, Korea, which was monitored for about two years (2005-2006). Parameters of concern include redox-sensitive indicators such as pH, DO, EC, ORP, DOC (dissolved organic carbon), NH₃, NO₃ and SO₄. About 10 years have elapsed after closing dumping of municipal wastes in the landfill. Leachates showed widely varying concentrations in COD(136~263 mg/L), T-N(121~186 mg/L), and NH₃-N(14~369 mg/L). Groundwater at the immediate downgradient of the landfill showed weakly acidic pH condition but very high levels of EC (3,000-4,000 µS/cm), which indicated that the groundwater was largely affected by the landfill leachate. Cl⁻, a conservative ion, showed over 200 mg/L at the landfill border, but a gradually decreasing level with distance from the landfill, representing dispersion and dilution (natural attenuation) due to mixing with surrounding groundwater and replenished rainwater. Redox potential showed negative value at the landfill border but it increased up to 350 mV at downgradient wells, which indicated conversion of redox condition from reducing to oxidizing ones. Ammonia, was largely enriched at most of the monitoring wells and its level greatly exceeded drinking water standard. In summary, all the parameters evidenced occurrence of natural attenuation with distance and with time but further monitoring is still required.

Key words : Groundwater quality, Groundwater contamination, Leachate, Closed landfill

요 약 문

본 연구에서는 W시에 있는 비위생매립지 주변의 지하수질 약 2년간 관측하고 그 결과를 평가하였다. 주요관심 인자는 산화환원조건에 민감한 pH, 용존산소, 전기전도도, 산화환원전위, 용존 유기탄소, 암모니아, 질산성질소 및 황산이온 등이다. 본 매립지는 생활쓰레기 매립지로 매립종료 약 10년이 경과하였다. 매립지 침출수는 COD 136~263 mg/L, T-N 121~186 mg/L, NH₃-N 14~369 mg/L이며, 계절적 변동이 크게 나타났다. 매립지 직하부 지하수는 약산성을 띠나 전기전도도가 매우 높아 침출수 누출의 영향을 나타내었다. 염소이온의 경우 200 mg/L 이상으로 높으나 거리가 멀어짐에 따라 점차 감소하였는데 황산 및 회석 등의 자연저감효과가 큰 것으로 사료된다. 매립지 내부에서는 산화환원전위가 음의 값을 보이거나 하부에서는 350 mV까지 증가하여 혐기성환경에서 산화환경으로의 전이를 나타내었다. 암모니아는 가장 우려되는 지하수질 인자인데 대부분의 관측점에서 크게 부화되어 있으며, 먹는물 수질기준을 상회하였다. 본 매립지 하부의 오염지하수질은 시공간적으로 자연저감 현상이 뚜렷하나 지속적인 수질모니터링이 필요한 것으로 판단된다.

주요어 : 지하수질, 지하수오염, 침출수, 사용종료매립지

*Corresponding author : jkpark@emc.or.kr

원고접수일 : 2007. 5. 18 게재승인일 : 2007. 5. 23

질의 및 토의 : 2007. 8. 31 까지

1. 서 론

매립된 폐기물은 장기간에 걸쳐 서서히 분해되면서 침출수를 발생시키며, 차수시설이 없는 비위생매립지는 발생된 침출수가 매립지 외부로 누출될 경우 주변 지하수를 오염시킬 수 있다(Bjerg et al., 1995)

침출수에는 매립폐기물의 종류 및 성상에 따라 많은 유기물질과 유해물질이 함유될 수 있으며, 이들 오염물질은 지중으로 확산되면서 여러 메커니즘을 통해 그 농도가 감소된다(Figueroa, 1993). 생활폐기물 매립지의 침출수 중 대표적인 오염물질은 유기물질이며, 침출수에 의해 오염된 지하수의 경우 용존성 유기물질(Dissolved Organic Carbon, DOC)이 다량 존재한다(Hoehn et al., 2000).

우리나라에 분포하고 있는 중소규모의 매립지는 특히 침출수의 적절한 관리가 되지 않고 그냥 방치되어 있는 것으로 보고되었다(한강수계관리위원회, 2004). 미국의 경우 많은 매립지에서 발생침출수에 의한 지하수의 오염을 확인하였으며(Armeth et al. 1989), 국내에서도 침출수 누출에 의한 하천의 오염부하량을 정량적으로 산정하기 위한 연구 사례가 있다(한강수계관리위원회, 2004). 본 연구대상 매립지와 같은 계곡형은 우리나라에 가장 널리 분포되어있는 형태로서, 이러한 비위생매립지의 경우 침출수의 누출에 의한 지하수의 오염 가능성이 높을 것으로 추정된다.

매립지에서 발생된 침출수를 적절하게 차집하여 처리하지 못하고 누출될 경우 주변 환경에 영향을 미칠 수 있는 가능성이 크지만, 우리나라에서는 현재까지 매립지에서 누출된 침출수로 인한 지하수의 수질변화 및 그 영향을 평가하는 실증 연구가 부족하다.

본 연구에서는 사용 종료된 계곡형 비위생매립지에서 침출수의 누출에 의한 지하수오염의 현상을 파악하고, 시간의 경과에 따른 지하수의 수질변화와 거동특성을 평가하였다.

2. 연구지역 및 연구방법

2.1. 연구지역

연구대상 매립지는 강원도 W시에 소재하고 있는 매립면적 81,000 m²의 매립지로서, 1982년부터 13년간 생활폐기물 322,000 m³가 매립된 후 1995년에 사용 종료되었다(Lee et al., 2006). 매립지 계곡의 하단부에 약 20 m 높이의 옹벽을 설치하고 폐기물을 매립한 계곡형 매립지로서 매립당시 바닥면에 차수시설은 설치하지 않았다.

본 매립지는 낮은 구릉의 산들로 둘러싸여 있다. 매립지 하류 지역은 농경지(주로 벼 경작)로 이용되고 있으며,

매립지에서 일정거리(500 m) 떨어진 일부지역에는 주거용 아파트가 건설되어 있다. 본 지역에서는 지하수를 벼 경작을 위한 농업용으로는 이용하고 있으나 음용으로는 사용하지 않는 것으로 조사되었다.

2.2. 연구방법

2.2.1. 지하수 관측정

침출수의 누출에 의한 지하수 수질에 미치는 영향을 모니터링하기 위해 영향반경 지역에 지하수관측정을 설치하였다. 설치 깊이는 연중 지하수위의 변화를 고려하여 약 6 m 깊이로 13개소를 설치하였다(Fig. 1). 관측정은 폴리에틸렌(PE)재질의 무공관을 1.5 m 깊이까지 설치하고 그 이하의 깊이에는 유공관을 설치하여 지하수의 흐름 및 차집이 원활하도록 하였다.

지하수관측정 설치지점은 매립지 경계면으로부터 하류 방향으로 지형특성을 고려하여 매립지 직하부에서 130 m 까지 일정 거리간격을 두고 설치하였다.

2.2.2. 수질측정 및 분석

지하수 관측정에서 2005년 1월부터 2006년 10월까지 약 1개월 주기로 총 21회 지하수 시료를 채취하여 수질 분석을 수행하였다.

지하수 시료는 베일러를 사용하여 지하수 관측정에서 시료를 채취한 후 0.45 µm 필터를 사용하여 여과하였다. pH, EC, ORP (YSI556)와 산화성이 큰 물질인 NH₃-N는 필터링한 후 현장에서 직접 측정(DR2010)을 하였고, 나머지 DOC, Cl⁻, NO₃-N, NO₂-N, SO₄²⁻는 실험실로 운반하여 수질공정시험방법에 따라 기기분석(IC and TOC Analyzer)을 하였다.

본 연구에서의 논의는 2005년 초기부터 2년간 장기 모



Fig. 1. Locations of groundwater monitoring wells around the studied landfill.

니터링을 수행한 8개 관측정(WW1-WW8)의 지하수 수질을 대상으로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 침출수 수질

매립지 하부 옹벽 배수관을 통해 유출되는 침출수를 분석한 결과 화학적 산소요구량(COD)은 136~263 mg/L, 총질소(T-N)가 112~186 mg/L, 그리고 암모니아성질소(NH₃-N)가 14~369 mg/L로 처리가 필요한 상황이다(Lee et al., 2006). 초창기에는 발생하는 매립지 침출수를 하부의 처리시설에서 처리 후 방류하였으나 현재는 관리상의 문제로 침수 후 인근 하수처리장으로 보내어 처리하고 있다. 하지만 옹벽은 부분적으로 균열이 발생하여 그 틈새로 침출수가 유출되고 있다.

3.2. 지하수의 수질변화 특성

3.2.1. 수소이온농도(pH)

매립지 하부의 지하수관측정에서 주기적으로 pH를 측정한 결과 Fig. 2에서와 같이 대부분 pH 6~7의 범위로 약산성을 나타내고 있었으며, 매립지로부터 가장 하류부인 WW7~8관정에서 2005년 5월에 5.5 이하의 값을 나타내기도 하였으나 이후에는 약산성이긴 하지만 안정적인 pH 범위를 보이고 있다.

3.2.2. 용존산소(DO)

매립지 옹벽 아래 직하부 지하수의 용존산소는 1 mg/L 이하로 저하되어 있는 반면 매립지 하류부는 2 mg/L 이상으로 부화되어 있다(Fig. 3). 한편 여름철에 용존산소가 낮아지는 경향을 발견할 수 있었는데 이는 강우에 의해 증가된 수두구배로 더 많은 유기오염물질이 지하수에 공급되어 추가적인 산소의 공급에도 불구하고 유기물 분해가 활발히 일어난 결과로 사료된다(Lee et al., 2006).

3.2.3. 산화환원전위(ORP)

매립지 직하부 관정인 WW1~2관정에서 0 mV보다 작은 값을 보이는 경우가 많으며, 다른 관정에서는 100~350 mV까지 양의 값을 나타내었다(Fig. 4). 산화환원전위의 경우 산소가 많은 강우가 지하수로 침투할 경우 일반적으로 높게 나타난다. 그러나 본 연구에서는 건기에서 우기로 가면서 산화환원전위의 수준이 오히려 감소하는 경향을 보였으며, 이와 같은 감소는 매립지 내부의 환원조건이 우기에 증가된 지하수 유동에 의해 하류부로 확

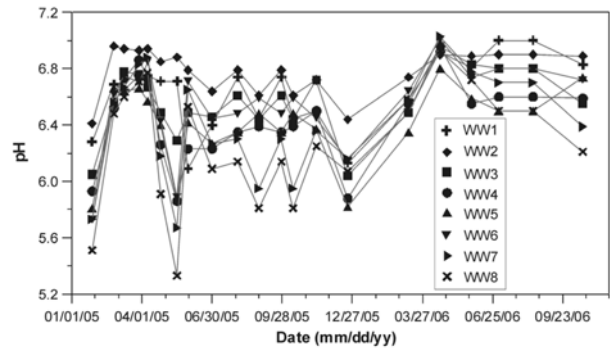


Fig. 2. Variation of pH.

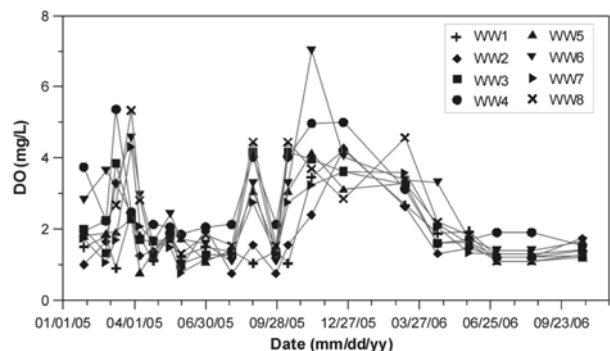


Fig. 3. Concentrations of DO (dissolved oxygen) with time.

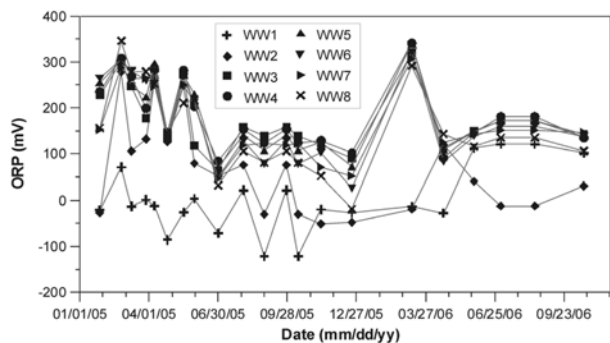


Fig. 4. Variation of ORP with time.

대되어 나타나는 것이거나 추가적으로 공급된 유기오염물질의 분해가 활발하였기 때문인 것으로 사료된다. 이와 같은 설명은 용존산소의 변화와도 거의 일치하는데, 하절기에는 미생물에 의한 유기물 분해로 DO가 결핍되고 또한 ORP도 감소하는 경향을 보이는 반면, 동절기에는 이와 반대의 경향을 보인다. 따라서 계절적 요인에 따라 매립지에서 누출되는 유기물질의 미생물의 분해정도가 다른 것으로 판단된다. 산화환원전위의 분산이 감소한 것은 강우

에 의한 희석 또는 균질화의 영향으로 사료된다.

3.2.4. 전기전도도(EC)

전기전도도는 지하수법에서 규정하고 있는 수질항목은 아니지만 지하수 오염을 확인할 수 있는 간접지표로서 우리나라의 깨끗한 천부 지하수의 전기전도도는 50-500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 범위이다. 대부분의 관정에서 1,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이상의 값을 보이고 있으며, 특히 매립지 직하부인 WW2 관정에서 3,000-4,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 높은 값을 보이다가 매립지로부터 가장 멀리 떨어진 WW8에서는 1,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이하로 감소되는 현상을 나타내고 있다(Fig. 5). 이는 침출수의 누출로 인하여 하류부까지 지하수에 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다. 우기(7~8월)에는 전기전도도가 전반적으로 낮은 경향을 나타내는데 이는 다량의 강우침투에 의한 희석의 영향으로 판단된다.

3.2.5. 염소이온(Cl^-)

염소이온은 지하수 오염의 주요 관심물질이다. 매립지 직하부인 WW2 관정에서 200 mg/L 이상의 높은 농도를 나타내고 있으며, 매립지로부터 가장 멀리 떨어진 WW8에서는 100 mg/L 이하의 값을 보이고 있다. EC와 마찬가지로

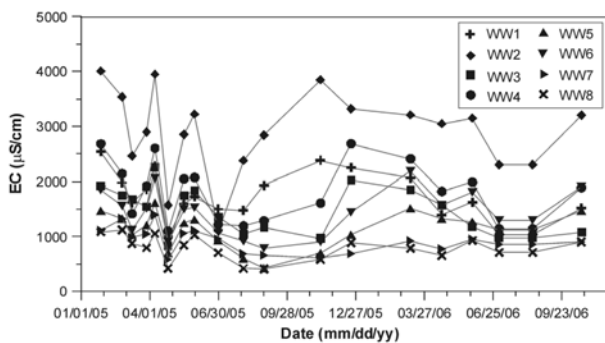


Fig. 5. Variation of EC at the monitoring wells.

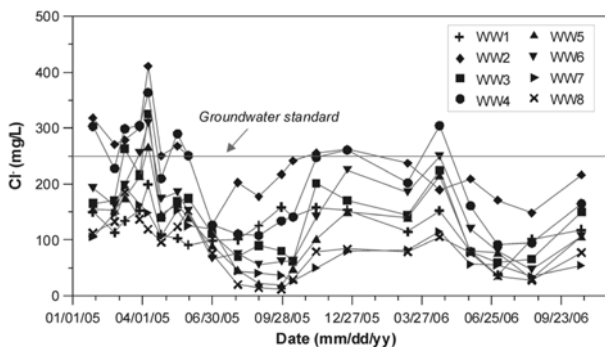


Fig. 6. Changes in concentrations of DOC.

가지로 우기(7~8월)에는 전반적으로 낮은 경향을 나타내는데 이는 강우에 의한 희석의 영향으로 판단된다(Fig. 6). 염소이온의 경우 토양에 흡착되거나 생분해되지 않으므로 농도가 감소한다는 것은 확산 및 희석효과를 반영하는 것이라 사료되며, 시간의 경과에 따라 농도도 점진적으로 감소하는 경향을 보이고 있다.

3.2.6. 용존 유기탄소(DOC)

총 유기물질의 농도를 나타내는 용존 유기탄소의 농도는 4~266 mg/L로 평균 30 mg/L이었다(Fig. 6). 매립지 직하부인 WW1~2관정에서 다른 관정에 비해 봄철에 그 농도가 현저히 증가하는 특성을 나타내다가 우기에는 이들의 농도가 다소 감소하는 경향을 나타내었다.

3.2.7. 암모니아성 질소 ($\text{NH}_3\text{-N}$)

암모니아성 질소의 농도가 모든 관측정에서 200 mg/L 이하의 수준이었지만 대부분의 농도는 우리나라의 먹는물 수질기준(0.5 $\text{NH}_3\text{-N}$ mg/L)을 크게 초과하고 있었다. 매립지로부터 직하부에 설치된 WW1~2관정에서 매우 높은 농도를 보이며, 하류부에 위치한 WW5~8관정에서는 5 mg/L 이하의 상대적으로 낮은 농도를 나타냈고 동시에 시간의 경과에 따라 농도가 현저히 감소하는 현상을 보였다(Fig. 7). 하지만 매립지로부터 주민 거주지역이 약 500 m 이내에 위치하기 때문에 지하수를 음용수로 사용할 경우 과잉의 암모니아성 질소는 건강상 문제가 될 수 있으므로 이에 대한 대책이 필요하다.

3.2.8. 질산성 질소($\text{NO}_3\text{-N}$)

일반적으로 매립지 내부는 혐기성환경으로 인해 질산성 질소가 고갈되어 있으나 매립지 외부는 산화 환경하에서 질산성 질소가 부화된다. 매립지 직하부 관정의 지하수는 대부분의 시기에 1 mg/L 이하의 질산성질소 농도를 보였

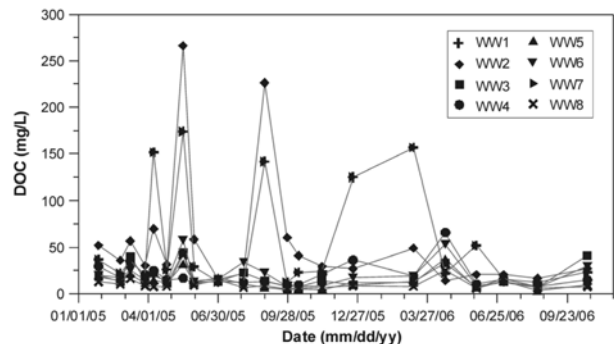


Fig. 7. Concentration of $\text{NH}_3\text{-N}$ with time.

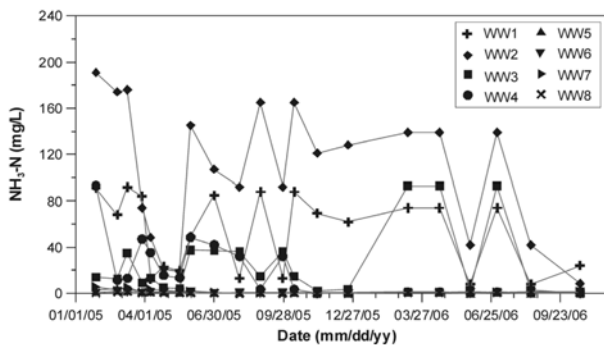


Fig. 8. Variation of concentrations of NO3-N.

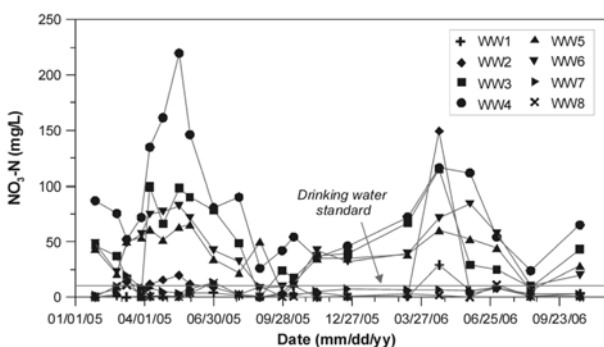


Fig. 9. Concentrations of sulfate with time.

으나 그 바로 아래 관정(특히 WW4)의 경우에는 그 농도가 현저히 높게 나타났다(Fig. 8). 이는 매립지 직하부와 달리 그 아래 지역은 투수성이 매우 양호한 모래질로서 직접적인 강우 침투가 가능한 지역으로 지표면의 투수성 차이에 의한 영향으로 판단된다. 특히 건기가 끝나고 우기가 시작되는 기간(5-7월)에 이러한 현상이 두드러지게 나타난다.

3.2.9. 황산이온(SO_4^{2-})

황산이온은 매립지에서 직하부 관정인 WW1~2관정의 경우 농도는 수 mg/L 이하로 매우 낮았다. 그러나 매립지로부터 거리가 멀리 떨어진 WW7~8관정에서는 그 농도가 90 mg/L로 현저히 높았으며, 하류부 관정에서 황산이온의 평균농도는 23.9 mg/L이었다(Fig. 9). 우리나라 먹는물 수질기준 200 mg/L에는 적합한 수준이다. 한편 강한 혐기성 조건을 지시하는 황화가스(S^2)는 거의 검출되지 않았다.

4. 결 론

본 연구에서는 W시에 위치하는 사용 종료된 비위생 매립지의 하류부에 지하수관측정을 설치하고 주기적으로 지하수질 분석을 통하여 침출수의 누출에 의한 지하수 오염

의 현상을 파악하고, 시간의 경과에 따른 지하수의 수질 변화를 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 생활폐기물을 매립하여 사용종료 후 약 10년이 경과한 연구대상 매립지의 침출수 수질은 COD 136~263 mg/L, T-N 112~186 mg/L 그리고 $\text{NH}_3\text{-N}$ 가 14~369mg/L를 나타내고 있었다.

2. 매립지 하류부 지하수질의 pH는 약산성을 띠고 있었으며, 전기전도도는 대부분 1,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이상의 값을 보이고 매립지 직하부의 관정에서 3,000~4,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 높은 전기전도도 값을 나타내어 침출수의 누출로 지하수질이 영향을 받고 있음을 지시한다.

3. 염소는 매립지 직하부 관정에서 200 mg/L 이상의 높은 농도를 나타내었으나 매립지로부터 거리가 멀어질수록 농도는 낮아졌으며, 이는 주변 지하수와 혼합 및 계절적 지하수 함양에 의한 희석의 영향으로 판단된다.

4. 산화환원전위는 매립지 직하부 관정에서 혐기성 환경으로 0 mV 보다 작은 음의 값을 보이다 하류부의 관정에서는 100~350 mV까지 양의 값을 보여 호기성환경으로의 전환을 나타내었다.

5. 용존 유기탄소의 농도는 4~266 mg/L로 평균 30 mg/L이었으며, 우기에는 강우 침투에 따른 영향으로 이들의 농도가 다소 감소하는 경향을 보였다.

6. 암모니아성 질소의 경우 매립지로부터 직하부 관정에서 매우 높은 농도를 보이나 하류부 관정으로 갈수록 농도가 낮아짐과 동시에 시간의 경과에 따라 농도가 현저히 감소하였다. 하류에서 발생하는 NH_3 의 감소는 호기성 환경하에서 NO_3 로의 전환을 의미하며, 이와 동시에 시간 경과에 따른 자연저감 효과를 나타낸다. 그럼에도 불구하고 대부분의 관정에서 암모니아의 농도는 먹는물 수질기준을 크게 상회하므로 대책이 요구된다.

7. 본 연구에서 약 2년간 관측한 대부분의 지하수질 파라미터는 거리 및 시간에 따른 자연저감을 지시하고 있다. 그럼에도 불구하고 정량적 자연저감 평가 및 하류 지하수의 보전을 위해서는 지속적인 수질모니터링이 요구된다.

사 사

본 연구는 한국환경기술진흥원의 차세대핵심환경기술개발 사업비를 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

한강수계관리위원회, 2004, 사용종료매립지 개선방안 조사연구.

- Armeth, J.D., Milde, G., Kerndorff, H., and Schleyer, R., 1989, Waste deposit influences on groundwater quality as a tool for waste type and site selection for final storage quality, *The Landfill Lecture Notes in Earth Sciences*, **20**, 39.
- Bjerg, P.L., Rügge, K., Pedersen, J.K., and Christensen, T.H., 1995, Distribution of redox-sensitive groundwater quality parameters downgradient of a landfill, *Environ. Sci. Technol.*, **29**(5), 1387-1394.
- Figuerola, R.A., 1993, Methane oxidation in landfill top soils. Proceedings Sardinia 93, 701-715.
- Hoehn, E., Johnson, C.A., Huggenberger, P., Amirbahman, A., Peter, A., and Zweifel, H.R., 2000, Investigative strategies and risk assessment of old unlined municipal solid waste landfills, *Waste Manage. Res.*, **18**, 577-589.
- Lee, J.Y., Cheon, J.Y., Kwon, H.P., Yoon, H.S., Lee, S.H., Kim, J.H., Park, J.K. and Kim, C.G., 2006, Attenuation of landfill leachate at two uncontrolled landfills, *Environ. Geol.*, **51**(4), 581-593.
- Lee, J.Y., Cheon, J.Y., Lee, K.K., Lee, S.Y., and Lee, M.H., 2001, Factors affecting the distribution of hydrocarbon contaminants and hydrogeochemical parameters in a shallow sand aquifer, *J. Contam. Hydrol.*, **50**(1-2), 139-158.