

금산 매립장 주변 대수층의 수리지화학적 특성 및 오염 확산 평가

오인숙¹ · 고경석^{2*} · 공인철³ · 구민호⁴

¹수자원연구원, ²한국지질자원연구원, ³영남대학교 환경공학과, ⁴공주대학교 지질환경과학과

Assessment of Hydrogeochemical Characteristics and Contaminant Dispersion of Aquifer around Keum-san Municipal Landfill

Insuk Oh¹, Kyung-Seok Ko^{2*}, In-Chul Kong³, Minho Ku⁴

¹Korea Institute of Water and Environment, KWATER

²Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM)

³Department of Environmental Engineering, Yeungnam University

⁴Department of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University

The purposes of this study are to investigate the hydrogeochemical characteristics of groundwaters around Keum-san municipal landfill, and to evaluate the contaminant dispersion from the landfill and its environmental impact. To achieve these goals, groundwater quality logging, hydrochemical analysis, multivariate statistical analysis, and contaminant transport modeling were performed. The water quality logging indicated a leaking from the landfill at the depth of 4-12 m around a leachate sump. Electrical conductivity data indicated that groundwaters within 70-100 m from landfill were affected by the landfill leakage. Principal components 1 and 2 obtained from principal components analysis (PCA) reflect the influence of leachate and the characteristics of aquifer media, respectively. The results of principal component analysis also indicated the natural attenuation processes such as cation exchange, sorption, and microbial biodegradation. The modeling results showed that groundwater flow westward along a valley from the landfill and contaminants transport accordingly.

Key words : landfill, leachate, principal components analysis, groundwater flow, contaminant transport

본 연구의 목적은 금산 생활쓰레기 매립장을 대상으로 지하수의 수리지화학적 특성과 통계분석을 통하여 침출수의 누출원인과 누출경로 및 영향범위를 파악하고, 매립지로부터 발생하는 오염물질인 침출수의 누출이 연구지역의 지하수환경에 미치는 위해요인에 대해 정량적으로 평가하는 것이다. 본 연구를 위해서 수질 검출, 침출수와 지하수 수질 분석 및 통계분석, 그리고 오염물질 이동모델링 기법 등을 이용하였다. 수질검출 결과 침출수 집수정 부근에서 침출수가 주변 대수층으로 누출되고 있었으며, 매립장과 인접한 하류부 관측정의 4-12m 깊이에서 지하수에 대한 침출수의 영향을 확인할 수 있었다. 침출수는 유출 범위는 매립장으로부터 70-100m 내외이며 오염된 지하수에서 전기전도도는 400-750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 를 나타내었다. 주성분분석수행 결과 주성분 1과 2는 각각 침출수와 대수층의 매질 특성을 나타내었다. 주성분분석결과는 또한 침출수의 영향을 받는 지하수의 수질 변화에 의해 나타내어지는 양이온교환반응, 흡착 및 미생물 생분해 같은 자연저감과정을 나타내었다. 지하수 흐름 및 오염물 이동 모델링 결과 지하수는 매립장에서 서쪽으로 계곡을 따라 흐르며, 오염물질은 그에 따라 이동함을 알 수 있었다.

주제어 : 매립장, 침출수, 주성분분석, 지하수 흐름, 오염물 이동

1. 서 론

산업화와 도시화로 인한 국민생활의 향상은 각종 폐

기물의 발생량을 증가시켰으며 그 처리에 대한 문제들을 발생시켰다. 현재 우리나라의 경우 고형 폐기물의 대부분인 89.2%가 매립에 의존하고 있으며 2000년도

*Corresponding author: kyungsook@kigam.re.kr

환경부의 발표에 의하면 1999년까지 사용 종료된 매립장의 수는 전국적으로 1,072개소에 달하는 것으로 보고되고 있다. 이 중 81.6%가 폐기물의 위생적 처리를 위해 요구되는 폐기물의 저류, 침출수 차수 및 처리, 매립가스 제어 등과 같은 기능을 갖추지 않은 불량매립지로 추정되고 있다. 따라서 이들 불량매립지로 인한 지하수 및 토양오염 등 환경문제가 전국적으로 많이 발생하고 있을 것으로 전망된다 (Environment and Pollution Research Group, 2001). 1990년대 이후부터는 국내에서도 위생매립이 실시되었으나 위생처리를 한 매립지도 침출수 차수 및 처리를 위한 배수관로의 안정성문제에 의한 침출수 유출 등으로 매립지 주변 지하수계를 오염시키는 문제점이 발생되고 있다. 이처럼 매립지는 대표적인 지하수계의 오염원으로 이미 환경오염의 문제점을 나타내고 있는 불량매립지 뿐만 아니라 위생매립장의 안정화 문제에 따른 관련분야의 많은 자료와 연구가 필요한 실정이다.

매립장에서 침출수가 주변 지하수환경으로 누출되면 여러 가지 생지화학적 반응과정을 겪게 된다. 매립장 침출수는 매우 다양한 유기/무기 오염물질을 포함하며 이들이 지하수계로 누출되면 잠재적인 위험성을 내포하게 된다. 환경부에서 관련법을 제정하기 이전인 1990년대까지는 대부분이 비위생 매립의 형태로 매립장이 운영되었으며 이에 따른 인근의 오염이 심각하게 진행되어왔다. 최근에 들어서는 침출수 처리 시설을 갖춘 위생매립장의 건설로 그 정도는 많이 줄었으나 차수벽이 손실되어 침출수의 누출이 간혹 발생하기도 한다. 국외에서는 70년대 초반부터 매립지 주변의 지하수 오염에 대한 수리지질학 및 수리지구화학적 연구가 시작되었고 최근 들어서는 침출수로부터 발생하는 오염물질의 분해 및 이동에 대한 수리지화학 및 동위원소 연구들이 많이 수행되어 왔다(Christensen *et al.*, 1994, 2001; Bjerg *et al.*, 1995; Bergamaschi *et al.*, 1998; Heron *et al.*, 1998; Ludvigsen *et al.*, 1998; van Breukelen *et al.*, 2003, 2004a, 2004b; Heaton *et al.*, 2005; Scholl *et al.*, 2006). 국내에서는 난지도, 김포 및 부산 석대 매립지 등을 대상으로 매립지 주변 지하수의 유동과 오염물질의 이동에 대한 연구 및 안정화에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다(HANS Engineering Inc., 1994; Chung, 1995; Cha *et al.*, 1999; Kim *et al.*, 2001; Park *et al.*, 2007).

본 연구는 전형적인 생활쓰레기 매립장인 금산군의 양전 매립장을 대상으로 침출수와 주변 지하수의 수질 특성을 통해 연구지역 지하수의 수리지화학적 특성을

규명하여 침출수의 누출과 이에 따른 지하수계의 영향을 파악하고자 하였다. 이를 위하여 오염의 영향 정도에 따른 지하수 화학 조성의 변화를 수리지화학적으로 해석하고 주성분 분석과 군집분석을 통하여 주변 지하수에 대한 침출수의 영향을 정량적으로 나타내고자 하였다. 또한 침출수 이동 모델링을 수행하여 향후 오염의 확산을 예측하고자 하였다. 금산군 양전 매립장에 대해서는 침출수와 지하수의 유기산 분석 및 물리탐사를 이용한 연구가 지속적으로 수행된 바 있다 (Cheon *et al.*, 2007; Son *et al.*, 2005).

2. 연구지역 및 연구방법

2.1. 연구지역

침출수의 이동과 주변 지하수의 수리지화학적 특성 조사를 위하여 충남 금산군 금성면 양전리에 위치하는 매립장을 대상으로 연구를 수행하였다. 연구지역은 대규모의 대도시 매립장에 비해 비교적 작은 군단위의 생활쓰레기 매립장으로 지역적인 특성상 유해폐기물이 많은 산업시설이나 폐기물 유발시설이 적으며, 매립되는 쓰레기는 대부분 주민들에 의해 버려지는 음식 쓰레기를 포함한 생활폐기물이 대부분을 차지하고 있다. 금산 쓰레기매립장은 위생매립에 대한 법률이 제정되었던 1992년 이전부터 매립이 이루어져왔기 때문에 차수벽이 설치되지 않은 불량매립 시설과 당 시설이 설치된 위생매립이 혼재하는 곳이다(Fig. 1). 따라서 Fig. 1에서 볼 수 있는 바와 같이 연구지역의 남북 방향을 가로지르는 도로를 경계로 양편에 오래된 불량 매립지가 위치하며 연구 지역 중앙부에 위생매립장이 위치하고 있다. 금산 매립장은 전형적인 곡간 매립 방식으로 남동-북서 방향 계곡을 따라 쓰레기가 매립되었으며, 계곡을 따라 매립장 하류부는 논과 인삼밭으로 사용되고 있다. 불량매립 시설의 개선을 위하여 금산군에서는 2006년부터 매립지 상류부(Fig. 1의 남쪽 부분) 불량매립지의 폐기물을 굴착하여 선별 처리하여 쓰레기만 다시 위생 매립장에 매립하는 매립장 종료 및 안정화 공사가 실시하였다.

2.2. 수리지질 및 지하수 분석

시추 조사를 수행한 결과 매립장 하류부 지층은 크게 복토층, 퇴적층, 풍화층 및 기반암으로 구분된다. 시추 조사 결과에 의하면 매립장 하류부 토양은 2-3 m 사이는 점토와 실트가 20-30% 섞인 실트질모래층이며 3-4.5 m 사이는 대부분 모래층으로 구성되어 있다. 최

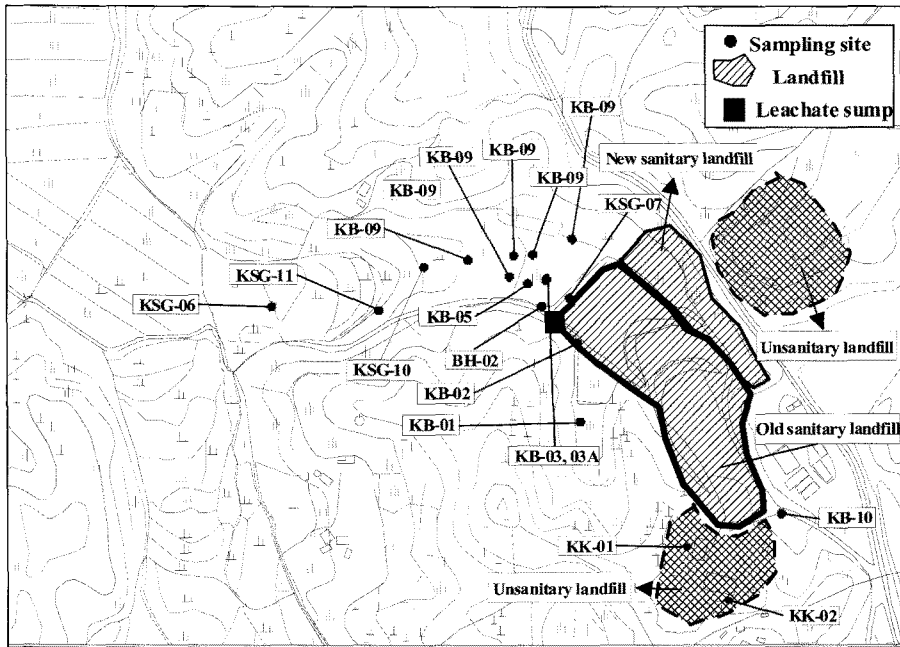


Fig. 1. The location map of wells and sanitary and insanitary landfills in the study area.

상부 20cm 두께의 점토질 실트층은 논으로 이용하기 위해 조성된 것으로 판단되며 점토질이 풍부하지만 사질토양이 많이 섞여 있어 강수 등에 의한 침투율은 높을 것으로 판단된다. 4.5 m 이하는 15 m 정도까지 기반암인 화강암의 풍화대가 형성되어 있으며 그 하부에는 기반암인 화강암이 분포하고 있다. 지하수 흐름은 지형의 구배를 따라 형성되어 있으며 지하수위는 지표 아래 1.04~6.97 m에서 관측된다. 지하수 수위와 수질 모니터링을 위하여 지하수 흐름 경로를 따라 매립장 상류부에 1개, 하류부에 11개의 관측정을 설치하였다. 이들 관측정은 연구지역에 기존의 농업용 관정 4개를 포함하여 수질분석을 수행함으로써 매립장에 의한 주변 대수층의 침출수의 영향을 파악하고자 하였다. 침출수는 매립장 상류부의 불량매립지 2개 관정(KK-01, KK-02)과 현재 발생중인 위생매립지의 침출수 1개를 포함한 모두 3개의 시료를 채취하여 분석하였다(Fig. 1). 침출수 누출을 감시하기 위한 관측정은 지형적 특성을 고려하여 매립장으로부터 지하수 흐름이 유도되는 계곡을 따라서 설치하였으며 시추와 물리탐사 자료를 근거로 하여 기반암이 나타나는 깊이인 평균 15 m 정도로 총 11개를 설치하였다. 매립지로부터 발생하는 침출수 누출을 관측하기 가장 가까운 위치하는 KB-03 관측공은 4 m 깊이의 상부공(KB-03A)과 4 m 이하를 관

측할 수 있는 KB-03의 다중 심도 관측공을 설치하였다. KB-10 관측공은 매립장 상류부 즉 고도가 높은 언덕에, KB-01은 서쪽 능선에서 유도되는 지하수 흐름과 배경수질을 관측할 수 있도록 설치하였다.

지하수 시료는 현장에서 각 시료의 물리적 특성인 온도, pH, Eh, 전기전도도(EC), 용존산소량(DO)를 측정하여 이들 값이 안정된 후에 시료를 채취하였다. Fe(II), Fe(III), Mn(II), H₂S, NH₃-N, Total-N은 쉽게 변하는 성분이므로 현장에서 발색 시약을 이용하여 처리한 후에 분광분석기(Spectrophotometer, HACH DR-2400)를 이용하여 측정하였다. 실내 분석을 위한 양이온과 음이온은 0.45 μm의 멤브레인 필터로 여과한 후 양이온 분석을 위한 시료에는 농질산을 첨가하여 pH < 2 이하로 유지하여 이온이 흡착하는 것을 방지하고, 음이온 분석을 위한 시료는 4°C로 냉장 보관하였다. 이들 시료들은 실험실로 운반하여 음이온은 이온크로마토그래피(IC, ion chromatography; Dionex, USA)로, 양이온은 유도결합 플라즈마 원자방출분석기(ICP-AES; Jovin Yvon, France)로 분석하였다.

연구지역 지하수 수질의 수직적 변화를 통하여 침출수의 누출 영향을 파악하기 위하여 수질검층 측정기(Quanta · G, Hydrolab)를 이용하여 설치된 관측공에 대한 지하수의 심도별 수온 및 수질변화를 측정하였다.

수질 검층은 매립장 하류부 6개 관정에 대하여 지하수면으로부터 0.5 m 간격으로 지하수의 pH, 산화환원전위(Eh), 전기전도도(EC), 용존산소량(DO) 및 온도를 측정하였다. 측정하기 전에 검층장비는 보정 용액을 이용하여 보정하였으며, 측정 방법으로는 하향식으로 측정구간에서 수동측정을 하였다.

2.3. 통계분석

본 연구에서는 침출수에 대한 매립장 주변 지하수에 대한 영향을 파악하기 위하여 SAS 6.0 프로그램을 이용하여 주성분분석과 군집분석을 수행하였다. 주성분분석(PCA, Principal component analysis)은 수질 성분들 사이의 분산공분산 관계를 이용하여 전체 분산을 설명하는데 중요한 2-3개의 주성분(Principal component)으로 전체 수질 변동 요인을 해석하는 다변량 통계분석기법이다 (Davis, 1986; Stezenbach *et al.*, 1999). 본 연구에서는 지하수 수질 특성 자료를 이용하여 주성분 분석을 실시하여 연구지역의 전체 수질 특성을 설명하는 새로운 변수, 즉 주성분을 구하여 배경지하수와 침출수 특성의 상관관계를 알아보고자 하였다. 군집분석(Cluster analysis)은 여러 개체들을 어떤 성질에 따라 분류하여 동질적인 몇 개의 군집으로 분류하는 것으로 개체들 간의 유사성 또는 비유사성 정도를 측정하여 개체들이 가까운 순서대로 군집화하는 방법으로 이 연구에서는 군집간의 거리를 정의하는데 있어 Ward(1963)에 의해 사용된 방법을 이용하였다.

2.4. 지하수 흐름 및 침출수 이동 모델링

침출수의 누출에 의한 영향이 향후 매립지 주변 대수층에서 영향 범위 및 이동 특성을 알아보기 위하여 MODFLOW/MT3D를 이용한 모델링을 수행하였다. 지하수 유동 및 침출수 이동 모델링에 사용된 입력변수들은 지표지질조사, 시추조사 등을 통한 세부 지하지질 조사 결과와 현장수리시험에 의해 획득한 대수성 수리특성 자료를 이용하여 입력 자료로 활용하였다. 수리전도도와 저류계수를 추정하기 위하여 설치된 관측정을 이용하여 현장에서 슬러그시험(Slug test)에 의한 순간수위변화시험을 수행하였다. 슬러그시험에서 자동수위관측기(Diver)로 관측된 수위 변화는 AQTESOLV(ver 2.5) 프로그램을 이용하여 수리전도도와 저류계수를 추정하였다.

지하수 유동 모델링은 MODFLOW(ver 4.1)을 이용하였으며 모델링을 위한 대상영역을 1:25,000 금산 수치지형도를 이용하여 지형을 모사하고, 매립지형 및 고

도분포 파악, 고도에 따른 초기수두(Initial head) 현황을 파악하였다. 연구지역내 집수구역은 매립장내 전체적인 지하수 흐름 분포 및 지하수 오염분포 파악 및 예측에 중점을 두어 매립지 주변 능선과 골짜기, 하천 등을 따라 설정하였다. 모델 영역은 가로 780 m, 세로 515 m, 높이 50 m로 설정하였고 셀의 크기는 가로 7.8-15.6 m, 세로 3.4-10.3 m로 설정하였으며 좀 더 세밀한 지하수 흐름 모델링 결과를 얻기 위해 하천과 침출수가 누출되는 지역은 더 조밀하게 격자망을 설정하였다. 모델링에 사용된 경계조건은 매립장 하류에 위치한 수심 30cm 내외인 하천을 일정수두경계를 지표면을 기준으로 설정하였고, 집수구역을 제외한 지역은 비활성셀로 설정하였다(Fig. 2). 오염물질 이동 특성을 알아보기 위하여 Park *et al.*(2006)의 연구결과 알려진 침출수 집수정 부근을 가로 31.2 m×세로 20.6 m의 점오염원으로 설정한 후 오염 이동 모델링을 수행하였다. 지층의 수직적 구조는 시추조사 자료를 근거로 지표로부터 퇴적풍화층(layer-1)은 21 m, 기반암(layer-2)은 매립/풍화층 아래 29 m의 두께로 존재하는 것으로 설정하였다.

4. 연구 결과 및 토의

4.1. 침출수 특성

일반적으로 매립지 침출수는 강우에 의해 침투된 물과 폐기물 내 미생물의 생물학적 분해 작용에 의하여 생성된 생물학적 및 화학적 물질에 의해 생성된다. 따라서 침출수는 쓰레기의 분해산물을 포함하고 있고 박테리아 활동과 화학적 반응 및 매립가스에 의해 영향을 받게 된다. 침출수의 화학적 조성은 매립지의 폐기물 종류, 매립지 경과 정도, 시료채취 상황 등에 따라 매우 다양하게 나타난다(Christensen *et al.*, 2001). 매립지 주변 지하수계의 특성은 침출수의 이동 및 확산 경로를 결정하며 오염물질의 생물학적 및 화학적 특성을 변화시키고 지질매체와의 반응을 통하여 오염물질을 자연 저감시키게 된다. 매립지의 침출수는 매립 폐기물 특성에 따라 다른 특성을 보여준다. Oh and Chon (1996)는 일반 생활폐기물과 산업폐기물 매립지 침출수 성분에 대한 비교 연구를 수행한 바 있으며 이들 성분에 있어서 뚜렷한 차이를 보여주었다. 국내 대표적인 일반폐기물 매립지인 난지도 매립지와 산업폐기물 매립지인 화성매립지의 침출수 분석결과를 보면 두 침출수 모두 양이온은 Na, K가 우세하며 음이온은 일반폐기물 매립지 침출수의 경우 HCO₃가, 산업폐기

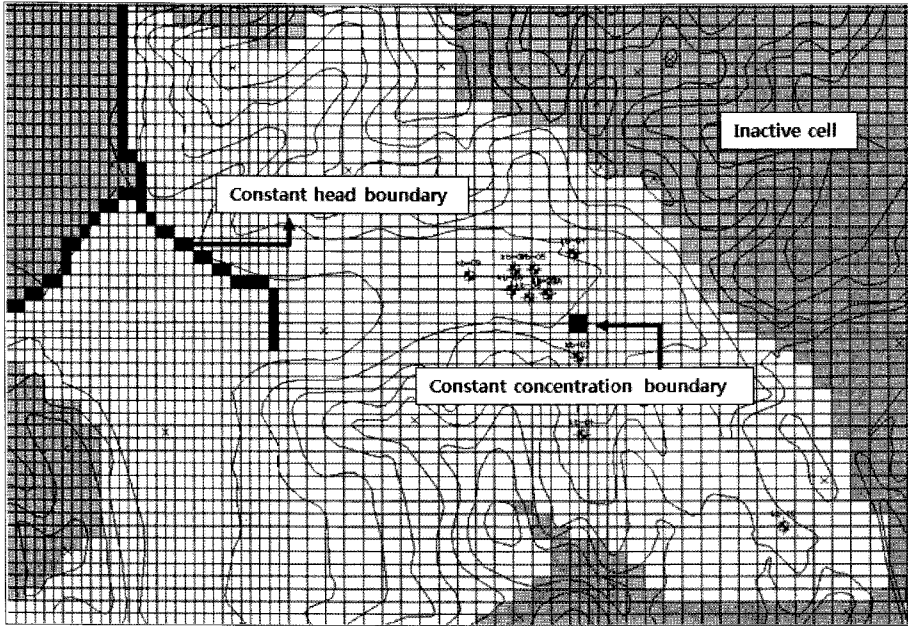


Fig. 2. Model boundary of the study area.

물 매립지 침출수의 경우 SO_4 가 우세한 특징을 볼 수 있다. 이는 산업폐기물 매립지에서 실시되는 폐기물의 고형화 및 안정처리에 기인한 SO_4 의 부화와 일반폐기물 매립지의 경우 생활쓰레기에 의한 유기물질의 함량이 상대적으로 높아 생분해가 활발하게 일어나기 때문이다(Oh and Chon, 1996).

본 연구지역에서 발생하는 침출수는 모두 생활폐기물 쓰레기이지만 오래된 비위생매립지와 현재 가동 중인 위생매립지의 침출수는 매립된 쓰레기 종류와 시기의 복합적인 영향에 따라 서로 다른 특성을 보여주었다. 본 연구에서는 현재 매립 중인 위생 매립지에서 발생하는 침출수와 연구지역 남쪽 비위생 매립지에 설치된 2개 관정에서 채취한 것들이 분석되었다(Table 1). 침출수 분석 결과 매립이 현재 진행 중인 위생매립지의 침출수의 전기전도도(EC)는 3,710-5,490 $\mu S/cm$ 로 비위생 매립지의 2,160-2,510 $\mu S/cm$ 보다 높은 값을 나타냈다(Table 1). 침출수에서 전형적으로 증가하는 위생매립지의 Na, K와 Cl은 각각 292.5-408.0 mg/L, 194.5-252.2 mg/L, 415.7-594.6 mg/L를 나타내었다. 이에 비해 비위생 매립지에서는 Na, K와 Cl이 각각 84.5-93.5 mg/L, 87.9-88.8 mg/L, 162.2-169.6 mg/L로 위생매립지보다 낮은 값을 보여주었다. 쓰레기의 유기물질 분해에 의해 침출수에서 증가하는 HCO_3 도 위생 매립지가 1,479.8-2,534.6 mg/L로 비위생 매립지의

1206.9-1439.1 mg/L보다 상대적으로 높은 값을 나타내었다. 현재 매립 중인 쓰레기에서 발생하는 침출수 대부분 성분이 구 매립지보다 높은 것은 비위생 매립지의 쓰레기에서 염류 성분이 이미 많이 용출되고 유기물질의 분해도 많이 진행되었기 때문이다. 또한 비위생 매립지 시추 코아 관찰 결과 대부분 연탄재와 같은 물질들로 구성되어 있어 음식물 성분이 많은 위생매립장의 쓰레기보다는 미생물 분해 작용에 의해 HCO_3 의 증가 효과가 상대적으로 적다. 유기물질 분해에 따른 산물인 총질소와 암모니아 질소 함량도 현재 매립이 진행 중인 위생매립장에서 발생하는 침출수가 높은 값을 나타내었다(Table 1).

4.2. 침출수와 지하수 수질 변화 특성

연구지역인 생활폐기물 매립장 주변의 지하수 및 침출수에 대한 수리지화학적 특성을 살펴보면 지하수 조성은 매립지에서 발생하는 침출수에 의해 영향을 받을 수 있다. Table 2는 각 관측정 지하수 시료의 분석 자료를 앞서 연구되었던 수질검층과 현장자료를 근거로 하여 배경지하수, 침출수, 오염지하수로 분류하여 나타낸 것이다. 배경지하수 수질 특성을 살펴보면 연구지역 기반암이 화강암이고 천부지하수의 일반적인 지하수 성질, 즉 Ca과 HCO_3 가 지배적인 특성이 잘 반영되어 나타났다(Lee et al., 1997). 대부분의 지하수

Table 1. Chemical compositions of leachates from sanitary and insanitary landfills.

Comp.	unit	New Leachate				Old Leachate	
		KSG-12	KSG-12	KSG-12	KSG-12	KK-02	KK-04
		11/03	01/04	10/04	11/05	10/04	10/04
T	°C	18.3	14.7	22.1	15.3	19.1	20.4
pH		7.53	8.83	8.70	7.97	6.87	7.06
Eh	mV	-59	108	132	173	-70	-99
EC	µS/cm	3900	3710	5490	4550	2510	2160
DO	mg/L	3.81	8.30	4.62	3.51	0.27	0.70
NH ₃ -N	mg/L		200.5	315.0		151.0	106.0
T-N	mg/L		205.0	429.0		144.0	126.0
F	mg/L			0.1		0.5	0.5
NO ₂	mg/L		21.9	2.9		4.4	4.4
Br	mg/L		1.9	1.3		0.5	0.6
Cl	mg/L	445.3	594.6	415.7	461.0	169.6	162.2
NO ₃	mg/L	1.4	54.1	0.6	10.3	1.2	1.3
SO ₄	mg/L	3.4	6.6	0.6	10.2	1.0	10.2
HCO ₃	mg/L	2196.6	1479.8	1859.6	2534.6	1439.1	1206.9
Ca	mg/L	119.0	41.6	41.4	36.6	85.0	76.1
K	mg/L	194.5	194.6	210.6	252.0	88.8	87.9
Mg	mg/L	37.0	36.6	35.1	52.2	33.9	26.0
Na	mg/L	292.5	350.0	360.0	408.0	93.5	84.0
Si	mg/L	7.5	7.2	8.1	10.6	12.6	6.9
Al	µg/L	12	8	22	525	11	6
Ba	µg/L	176	53	255	408	712	279
Cu	µg/L	2	7				
Fe	µg/L	3120	199	469	37	5850	4240
Li	µg/L	515	408	559		950	145
Mn	µg/L	2340	267	211	259	768	2630
Ni	µg/L	29	24				
Pb	µg/L	5	2				
Sr	µg/L	974	560	678		714	1350
Zn	µg/L	17	5	41		81	10
H ₂ S	µg/L			221		62	41

는 환원환경에 의해 전자수용체 전달과정에서 소모되는 산소와 전자에 의해 감소하는 용존산소(DO)와 산화환원전위(Eh)를 제외하고는 쓰레기와 분해산물로 증가하는 대부분의 성분(Na, K, Cl 및 HCO₃)에서 침출수에서 가장 높은 값을 가짐을 확인하였다. 각각의 성분들은 침출수에서는 주변 배경 지하수에 비해 12-75 배까지 높았으며, 오염된 지하수 또한 Na, K, Cl 및 HCO₃ 각각의 농도가 45.8, 7.9, 108.2, 220.8 mg/L로 배경 지하수의 값보다 3.6-4.8배 높았다(Table 2). Fig. 3은 침출수, 오염 지하수 및 배경지하수의 그룹별 수질 특성을 박스도로 비교한 것이다. 침출수와 오염 지하수에서 DO, Eh 및 NO₃가 배경 지하수에 비해 낮은 값을 보이는 것은 전술한 바와 같이 미생물 활동의 증가로 최종전자수용과정(TEAP)에서 전자수용체로 이용

되기 때문이다. 이러한 산화환원과정을 거쳐서 침출수와 오염 지하수의 대수층에는 환원환경이 형성되어 있음을 확인할 수 있었다. 본 연구지역의 경우 침출수가 광범위하고 많은 양이 누출되지는 않아 오염 지하수의 대수층의 경우 철망간 환원이나 질산염환원 환경이 형성되었으며, 침출수에서는 황산염환원 및 메탄 생성 환경에 놓여있는 것으로 판단되었다. 주요 성분(Na, K, Cl 및 HCO₃)에 있어서는 침출수, 오염지하수 및 배경 지하수에 있어 뚜렷한 차이를 보여줌을 또한 확인할 수 있었다.

침출수 영향의 공간적인 분포 특성을 알아보기 위하여 Stiff diagram을 작성하였다(Fig. 4). 도시된 그림을 보면 침출수와 배경지하수, 그리고 오염된 지하수의 성질이 서로 구분되어 나타나는 것을 볼 수 있다. 배경

Table 2. The hydrogeochemical characteristics of leachates, background and contaminated groundwater in study area.

Parameters	T	pH	DO	Eh	EC	H ₂ S	T-N	Cl	NO ₃	SO ₄	HCO ₃	Ca	K	Mg	Na	Fe	Mn	
unit	°C		mg/L	(mV)	(μS/cm)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(μg/l)	(μg/l)	
Background groundwater	Ave.	15.3	6.8	4.7	229.6	244	38.9	5.1	22.5	22.7	6.9	65	22.8	1.8	2.6	13.2	191	38
	Std.	1.6	0.6	1.8	56.4	90	33.2	1.3	13.7	9.4	4.7	26	8.2	1.4	1.2	3.6	488	58
	Min.	13.9	5.9	1.4	127.0	67	3.0	2.8	1.1	6.2	1.0	17	12.5	0.7	1.5	8.6	8	9
	Max.	17.9	7.7	8.0	301.0	394	117.0	6.8	48.6	40.2	15.6	109	37.0	5.6	5.3	19.8	1570	200
Contaminated groundwater	Ave.	17.2	6.7	2.2	119	805	61.9	8.1	114.9	7.7	19.2	233	64.1	8.6	5.4	48.7	519	1278
	Std.	1.6	0.7	3.5	106.8	528	55.3	13.5	96.6	10.8	8.6	196	36.9	8.1	2.9	32.7	788	1615
	Min.	15.0	5.9	0.1	-60.0	315	12.0	1.9	18.5	0.0	8.1	92	26.6	1.6	2.1	18.8	5	23
	Max.	20.4	8.4	11.7	320.0	2230	154.0	46.0	373.0	35.1	30.6	778	152.0	23.3	11.6	134.0	2100	5390
Leachate	Ave.	20.5	7.5	1.9	-12.3	3387	108.0	233.0	249.1	1.0	3.9	1502	67.5	129.1	31.7	179.2	3520	1203
	Std.	1.2	0.8	2.0	102.7	1494	80.4	138.8	117.8	0.3	4.4	270	18.8	57.6	4.0	127.9	2255	1034
	Min.	19.1	6.9	0.3	-99.0	2160	41.0	126.0	162.2	0.6	0.6	1207	41.4	87.9	26.0	84.0	469	211
	Max.	22.1	8.7	4.6	132.0	5490	221.0	429.0	415.7	1.3	10.2	1860	85.0	210.6	35.1	360.0	5850	2630

*H₂S: Sulfide(S²⁻), T-N: Total Nitrogen, Ave.: Average, Std.: Standard deviation

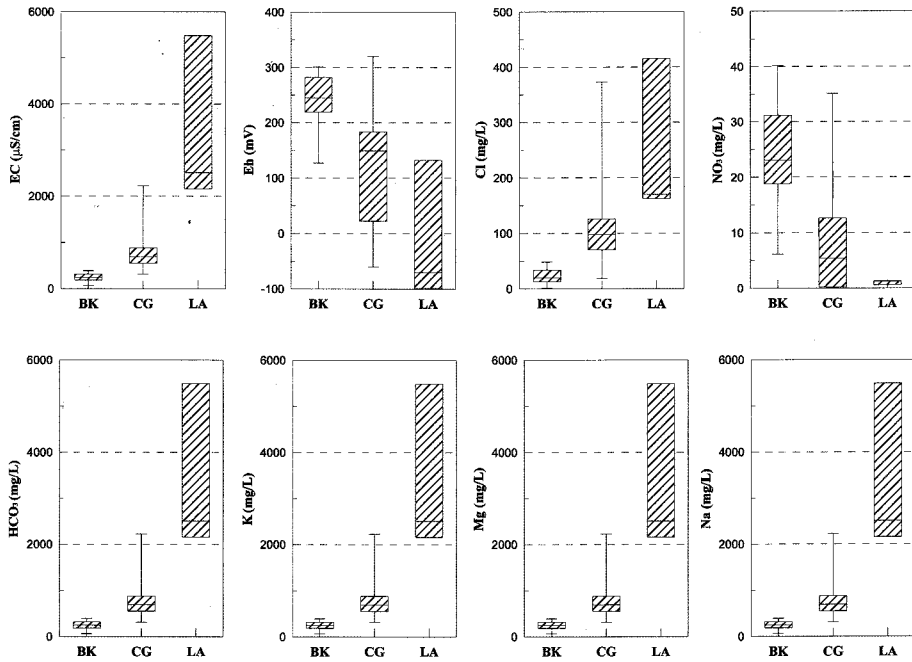


Fig. 3. The comparison results of hydrochemical components for background and contaminated groundwaters and leachates using the box-whisker plots in the study area.

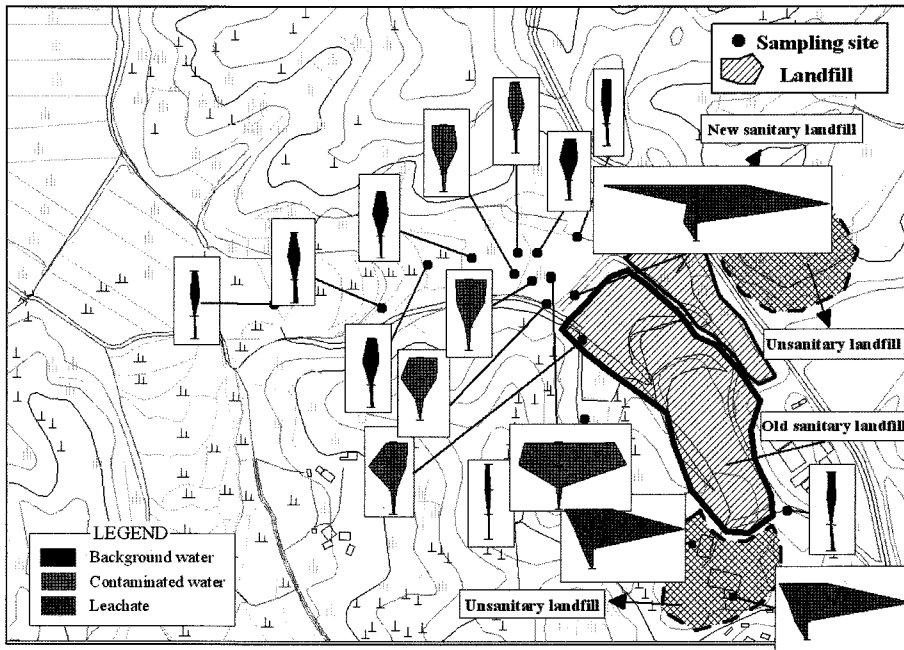


Fig. 4. The Stiff diagrams of leachates and groundwaters in the study area.

지하수에 비해 침출수는 이온 농도의 범위가 넓고 높은 값을 가지며 $[Na+K]-[Cl+HCO_3]$ 유형이 지배적이

다. 침출수의 영향을 보여주는 오염 지하수의 경우 침출수와 배경지하수가 혼합된 형태로 침출수와 비슷한

유형 특징을 보이거나 Ca보다 Mg가 우세하게 나타나는 것으로 보아 배경지하수의 특징을 반영하고 있다. 침출수의 영향을 받는 오염 지하수는 침출수 집수정(Fig. 1)과 가까운 곳에 위치하는 관정이 대부분으로 이 부근에서 침출수의 누출이 발생함을 확인할 수 있었다. 이러한 수질의 공간적 분포 특성은 Park *et al.*(2006)이 수행한 전기비저항 모니터링 결과와 일치하는 것으로 뒷 절에서 침출수 이동 모델링을 수행하기 위한 근거로 이용될 수 있음을 입증하였다.

침출수 및 지하수 시료들의 총 용존 성분의 양을 나타내는 전기전도도와 각 성분 간의 상관관계는 Fig. 5에 나타나 있다. Fig. 5은 침출수의 영향정도를 잘 나타내는 인자인 Cl, HCO₃ 및 전기전도도(EC)의 관계도로서 이들은 서로 양의 상관관계를 보여준다. 침출수에서 총용존성분의 함량을 나타내는 전기전도도(EC)가 증가함에 따라 염소이온(Cl)은 로그함수 형태로 증가된

다. 이는 총용존성분이 염소이온과 같이 폐기물에서 직접 발생하기도 하지만 중탄산염과 같이 폐기물의 미생물 활동 증가에 따른 이차적인 분해 산물에 의한 증가도 동시에 동반하기 때문이다. 따라서 중탄산염의 경우 침출수에서 지수형태로 증가하게 되는 특징을 보이며 Cl과 HCO₃도 지수형태의 증가특성을 보여줄 수 있다. 침출수에서 중탄산염의 급격한 증가는 Ca과의 상관관계에서도 또한 확인할 수 있다. 침출수에서 이러한 급격한 중탄산염의 증가는 탄산염 광물의 침전가능성을 증가시키게 되며 침출수 차집관 벽에 탄산염 광물이 성장하여 막힘 현상(clogging)을 발생하기도 한다(Levine *et al.*, 2005; Manning, 2001).

4.3. 지하수 수질 검층 결과

Park *et al.*(2006)에 의한 연구지역 전기비저항 모니터링 결과와 앞 절의 공간적 수질 분포 결과로부터 매

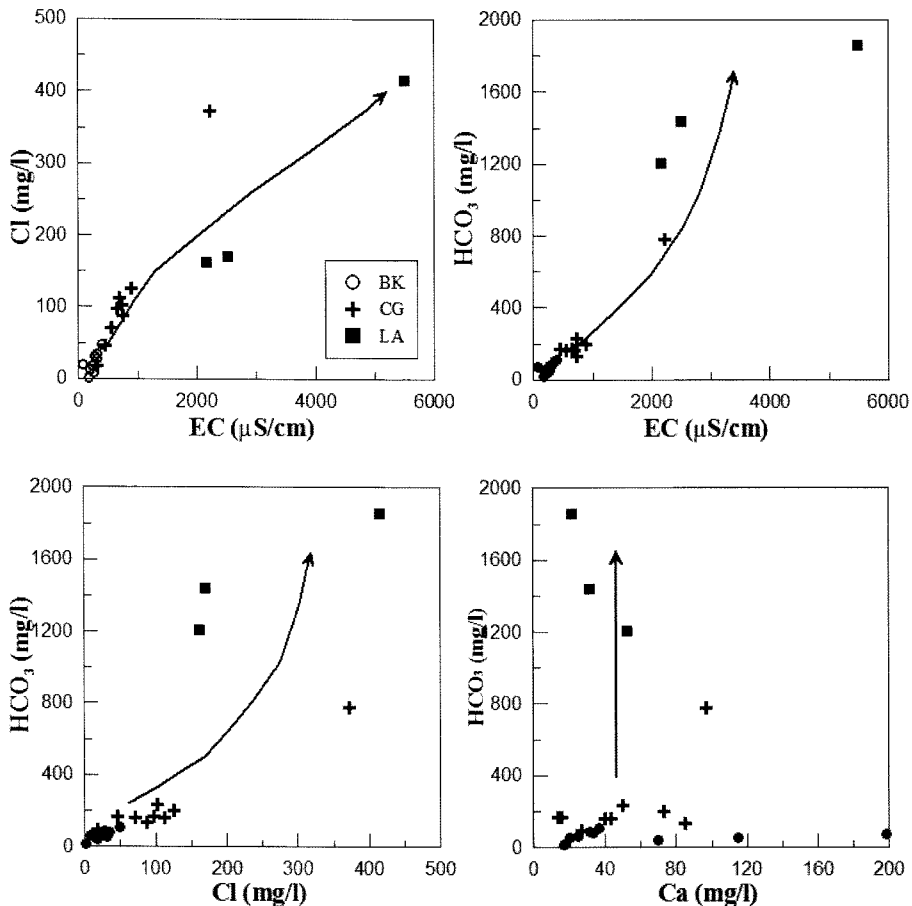


Fig. 5. The major ions properties of leachates and groundwaters collected in the vicinity of Keumsan landfill site (BK: Background groundwater, CG: Contaminated groundwater, LA: Leachate).

립장 경계부에 위치하는 침출수 집수정 부근에서 오염 물질이 누출되는 것이 확인되었다(Fig. 1). 따라서 본 절에서는 대수층에서 어느 정도 깊이에서 침출수가 누출되어 지하수에 영향을 미치는지에 대한 분석을 수행하기 위하여 매립장 하류부에 설치되어 있는 관측정에서 수질 검증을 수행하였다.

수질 검증 결과 매립장 집수정을 기점으로 하부에 위치한 관측정 KB-02, KB-03, KB-03A, KB-06의 경우 침출수 누출에 의한 영향을 받아 깊이별로 차이가 있기는 하지만 전기전도도가 최소 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 최대 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 높은 값을 나타내었다. 이러한 관측정에서는 침출수에 의한 환원환경의 형성으로 용존산소량도 2.0 mg/L 이하의 낮은 값을 보여주었다(Fig. 6). 침출수의 영향을 받으며 침출수 집수정에 가장 가까운 KB-02의 경우 지표하 10 m 부근에서 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 정도로 높은 전기전도도를 보여주었다. KB-02보다 고도가 3-4 m 정도 낮고 주변에 얇은 웅덩이가 있는 KB-03은 전 구간에서 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이상의 전기전도도를 가지며 깊어질수록 침출수의 영향이 줄어드는 것을 알 수 있다. KB-03보다 매립장에서 더 먼 KB-06의 경우 4 m 깊이에서 급격하게 전기전도도가 증가되며 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 정도의 값을 가지며 용존산소도 거의 0.5 이하의 값을 보여주었다. 오염된 지하수에 비해 매립장 상부에 위치한 KB-01시험정과 매립장 하부에 위치하는 KB-04, KB-05, KB-08 관측정의 전기전도도는 100-350 $\mu\text{S}/\text{cm}$

로 연구지역에서 오염의 영향이 없는 전형적인 배경 지하수의 수질을 유지하였으며 용존 산소도 최소 2.0 mg/L 이상의 값을 나타내었다. 본 연구의 수질 검증 결과는 침출수의 영향정도를 뚜렷하게 보여주므로 매립장 주변의 침출수 유출에 따른 지하수 오염범위를 예측하는데 중요한 근거 자료가 될 것으로 판단된다. 수질 검증 및 공간적 분포 특성에 의해 관측된 침출수에 의한 지하수의 오염 범위는 매립장으로부터 약 70-100 m 내외인 것으로 판단되었으며 매립장 침출수 집수정 부근에서 침출수의 누출이 발생하여 지하수 흐름 방향을 따라 하류부로 이동하는 것으로 나타났다.

수질 검증의 공간적 분포 특성을 살펴보면 앞 절의 Stiff diagram의 결과와 동일함을 확인할 수 있었다. 매립장 하류부 좌측에 위치하는 KB-02, KB-03, KB-06은 침출수의 영향을 보여주었으나 우측에 위치하는 KB-04, KB-05, KB-08은 배경 지하수 수질을 나타내었다. 침출수의 영향을 받은 관측정들에 대한 공간분포 결과는 기존의 비저항 모니터링 결과(Park *et al.*, 2006)와 앞 절의 수질 특성에서 확인된 침출수 집수정으로부터 금산 매립장의 침출수가 누출되고 있다는 사실을 보여주는 결과이다. 수질검증 및 수질 공간 분포에서 볼 수 있는 바와 같이 오염 지하수와 배경 지하수 수질을 나타내는 관정들 사이의 거리는 40-50 m 정도 밖에 되지 않으며 이러한 침출수의 영향이 좁은 지역에서 확산이 폭넓게 발생하지 않음을 확인할 수

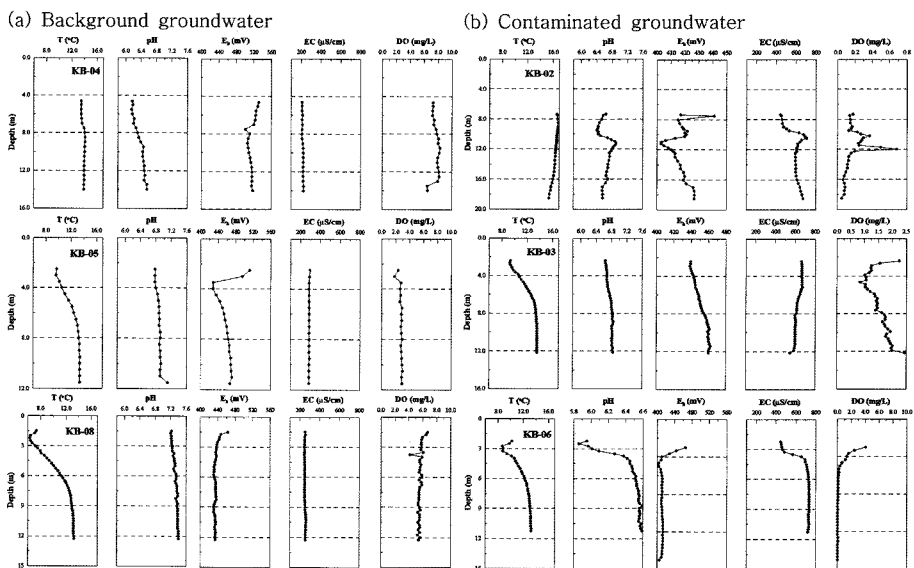


Fig. 6. Groundwater quality logging data indicating the influence of leachate.

있었다. 이러한 특징이 나타나는 것은 크게 두가지로 생각하여 볼 수 있다. 첫째 침출수 누출이 오래되지 않아 대수층으로 이동한 침출수의 양이 적기 때문에 확산이 적게 일어날 가능성이 있으며, 둘째 지층 특성과 지하수 흐름에 의해 유도되는 침출수의 선택적인 이동 경로와 상관성이 있을 가능성이 있다. Park *et al.*(2006)에 의해 수행된 전기비저항 모니터링 결과는 두 번째 가정인 지층의 특성과 이에 따른 지하수 흐름을 따른 침출수의 선택적 이동 가능성이 더 높음을 지시한다.

4.4. 주성분 및 군집분석 결과

매립지 침출수와 주변 지하수의 수질 변화 특성을 정량적으로 해석하기 위하여 주성분 분석과 군집 분석을 수행하였다. Table 3은 주성분분석(principal components analysis)에 의해 얻어진 인자 적재값(factor loading), 주성분의 고유값(eigenvalue), 분산 설명값(explained variance)을 나타내는 결과이다. 주성분분석 결과 주요한 3가지 주성분은 전체 분산의 80.9%를 설명하여 전체 수리지화학적 특성을 나타낼 수 있음을 확인하였으며, 이중 주성분 1은 전체분산에 대한 기여율이 52.0%, 주성분 2는 19.6%, 그리고 주성분 3은 9.2%이었다. 주성분 1은 전기전도도(EC, 0.939), Cl(0.899), K(0.866), Mg(0.907), Na(0.853), HCO₃ (0.962), Li(0.804)에 의해서는 양의 영향을 NO₃(-0.624)에 의해서는 음의 영향을 받음을 알 수 있다. 이들 성분은 일반적으로 침출수에서 쓰레기 분해에 증가되는 성분들이며, Li의 경우 침출수의 영향을 특징적으로 보여주는 성분이며 질산염의 감소는 미생물 활동의 증가에 따른 전자수용체의 감소를 나타낸다. 따라서 이러한 성분들에 의해 크게 영향을 받는 주성분 1은 침출수의 영향을 설명하고

Table 3. Factor matrix for the compositional variables of the groundwater samples.

Variables	Factor loadings		
	PC1	PC2	PC3
EC	0.939	-0.165	-0.256
Cl	0.899	0.204	-0.305
NO ₃	-0.624	-0.249	-0.008
SO ₄	0.023	0.872	-0.038
NO ₂	0.794	-0.344	0.372
Br	0.601	0.405	-0.286
HCO ₃	0.962	-0.240	-0.005
Ca	0.634	0.672	0.211
K	0.866	-0.392	-0.230
Mg	0.907	-0.336	0.13
Na	0.853	-0.149	-0.457
Si	-0.143	-0.463	0.351
Fe	0.658	-0.084	0.65
Li	0.804	-0.327	0.182
Mn	0.345	0.578	0.435
Sr	0.639	0.710	0.088
Eigenvalue	8.323	3.139	1.479
% of variance	52.017	19.618	9.243
Cumulative(%)	52.017	71.635	80.878

있으며 침출수 유출에 의한 오염을 의미한다. 또한 주성분 1의 고유값(eigenvalue)이 8.323으로 3개 요인 중 가장 큰 비중을 차지하고 있어 전체 분산에 대한 해석의 중요한 변수로 주성분 1에서 인자적재값(Factor score)이 크게 나타나는 요인들은 연구지역 전체 수질 변화에 미치는 영향이 매우 크다는 것을 의미한다. 주성분 2는 SO₄(0.872), Sr(0.710)에 의해 양의 영향을 크게 받으며 Si에 대해서는 음의 상관성을 보여준다.

Fig. 7는 주성분 1과 2의 인자 적재값(factor loading)

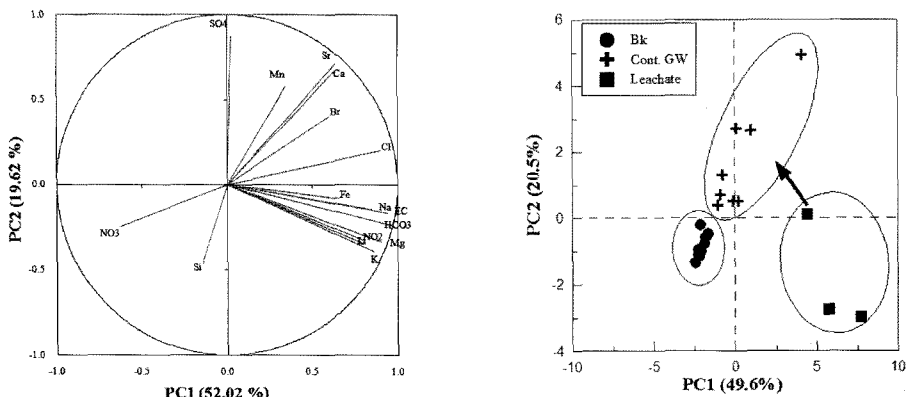


Fig. 7. The results of principal components analysis showing the hydrogeochemical change by landfill leachate.

과 인자점수(factor score)를 도시한 결과이다. 주성분 분석에 의한 도시한 결과를 보면 배경지하수, 침출수, 오염 지하수가 뚜렷하게 구분이 되는 것을 알 수 있으며 인자 적재값에 따른 요인들의 분포가 잘 부합되어 나타나는 것을 볼 수 있다. 침출수는 높은 PC 1과 낮은 PC 2 값을 가지며 Fig. 7의 Fe, Na, EC, HCO₃, Mg, K, Li에 가장 큰 영향을 받는 4사분면에 위치한다. 배경 지하수는 3사분면 원점 근처에 위치하며 거의 모든 시료가 분산되지 않고 모여 있다. 이에 반해 오염된 지하수는 1사분면 방향 즉 Sr, Ca 등이 증가하는 방향, 즉 PC1과 PC2가 모두 증가하는 방향으로 변화됨을 확인할 수 있다. 배경지하수에서 침출수로 변화되는 선상에 위치하지 않고 이렇게 변화하는 것은 침출수가 대수층으로 이동하면서 지질매체와 반응 즉 침전, 흡착, 양이온 교환 반응 등에 자연 저감되어 나타나는 현상으로 사료된다. 이는 침출수에서 상대적으로 높은 Na, K 등이 오염 지하수에서는 급격히 감소하면서 양이온 교환반응을 지시하는 Ca 등이 증가하는 특성에서 일부 확인할 수 있다. 군집분석 결과 앞 절에서 분류되었던 것과 같이 연구지역 21개 지하수 관측정은 크게 3개의 그룹(배경지하수, 침출수 및 오염지하수)으로 나누어진다(Fig. 8). 이러한 군집분석 결과로부터 지하수의 침출수에 대한 영향을 다시 확인할 수 있었으며 추후 오염부지의 수질 분석 결과를 이용한 오염 지하수의 영향을 군집분석을 이용하여 쉽게 구분

할 수 있는 방법으로 이용될 수 있을 것이다.

4.5. 침출수 오염물질 이동 평가

수리지화학 분석, 수질검층 및 비저항 모니터링 결과에 의해 탐지된 침출수 누출이 연구지역 매립장 주변 지하수에 미치는 영향을 평가하기 위하여 MODFLOW/MT3D를 이용하여 오염물질의 이동을 예측하였으며 모델링에 사용된 입력변수는 Table 4와 같다. 각 관정별 순간수위변화시험 결과 수리전도도는 KB-03, KB-03A, KB-04, KB-05, KB-07, KB-08, KB-09, KB-10에서 각각 2.3, 1.6, 1.5, 7.8, 5.1, 0.7,

Table 4. Input parameters used in contaminant transport modeling.

Input parameter		Value
Media characteristics	Hydraulic conductivity (m/day)	Layer-1 1.2
		Layer-2 0.083
	Total porosity	0.3
	Effective porosity	0.15
	Storage coefficient	0.1
	Recharge(mm/yr)	300
Matrix dimension	Longitudinal dispersivity (m)	10
	X-direction (m)	780
	Y-direction (m)	515
	Z-direction (m)	50

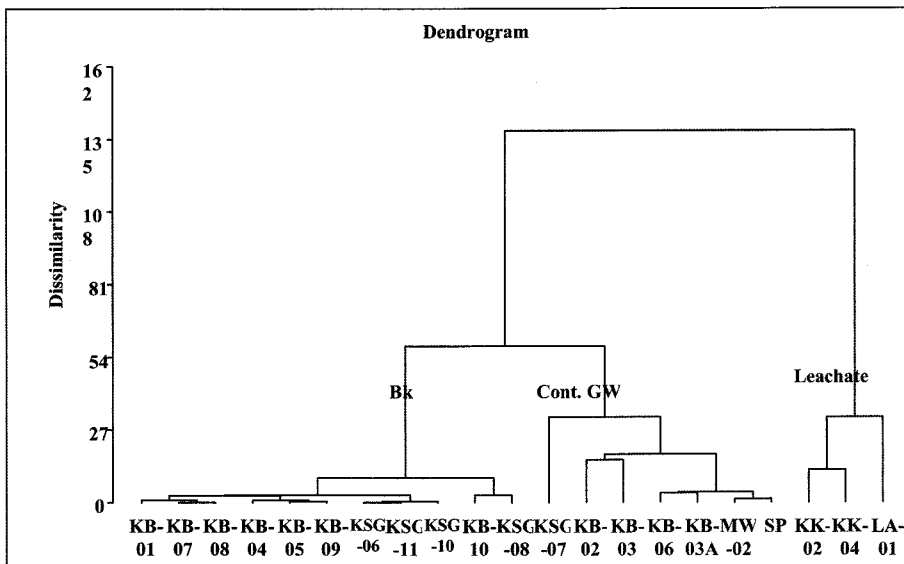


Fig. 8. The results of cluster analysis.

1.0 m/day 1.0-7.8 m/day의 범위를 보였으며 이 값들의 기하평균을 적용하여 추정된 값 1.2 m/day을 퇴적층의 수리전도도로 입력하였으며, 기반암의 수리전도도는 연구지역의 암종을 고려하여 우리나라 화강암반의 평균값인 0.083 m/day로 설정하였다(Jeon *et al.*, 2005). 저류계수는 순간수위변화 시험에서 측정된 각 관측공 값의 평균값인 0.1로 입력하였으며 총 공극률, 유효 공극률 및 중분산지수는 현장 측정값을 얻지 못하여 총 적층 대수층을 대표할 수 있는 0.3, 0.15, 10 m로 입력하여 모델링을 수행하였다. 지하수 함양량은 국가지하수정보센터에서 제시된 2004년 금산지역의 월별 함양율의 평균값인 20.2%를 근거로 금산 지역 강수량(2004년도) 1503 mm/yr에 적용한 300 mm/yr로 산정하였다. 앞 절에서 서술한 바와 같이 Park *et al.*(2006)의 전기비저항 모니터링 결과와 수질 특성 분석 결과로부터 매립지의 침출수 누출 지점은 침출수 집수정 부근에서 발생하는 것으로 조사되었다. 따라서 이동모델링을 위하여 침출수 누출을 집수정 부근의 영역으로 설정하였다. 침출수의 이동은 비반응성 성분인 염소이온(Cl)을 대상으로 모델링을 수행하였으며 성분의 농도는 위생매립지의 분석 자료인 415.7-594.6 mg/L의 범위 값 중 가장 낮은 측정치인 415.7 mg/L를 가정하였다(Table 1).

연구지역 지하수위 변화는 모형 보정을 통한 현재 지하수위를 정류상태(steady state)로 하였으며 연구지역에 설치되어 있는 관측정의 수위 관측 결과와 모델링으로부터 얻어진 지하수위를 비교 분석하였다. 보정에 사용된 요소들(각각의 경계조건, 지하수 함양량, 수리상수 등)은 불확실한 요소를 우선 순위로 선정하여 보정하였으며 모델 보정에 의해 얻어진 지하수위와 실제 관측된 지하수위로 그래프를 비교한 결과 매립장 상류부에 떨어져 위치하는 KB-10을 제외하고는 모두 95% 신뢰구간에 도시되어 비교적 실제 관측수위와 잘 일치함을 알 수 있었다. 따라서 본 모델링이 연구지역의 전반적인 지하수계를 특히 매립장 모사하였다고 할 수 있다(Fig. 9). 지하수 흐름 모델링 결과 연구지역에서 지하수는 매립장에서 서쪽으로 지형적인 특성을 따라 하천 쪽으로 흐르는 것을 확인할 수 있으며 매립장 하류부로 갈수록 남쪽 계곡지역에서 함양되는 지하수의 영향이 커짐을 알 수 있다(Fig. 10).

침출수 오염물질의 시간에 따른 이동 양상과 주변 지역으로의 영향 정도를 파악하기 위한 MT3D를 이용한 오염물 이동 예측 결과 MODFLOW에서 예측된 지하수 흐름과 일치하며 계곡을 따라 하천쪽으로 오염

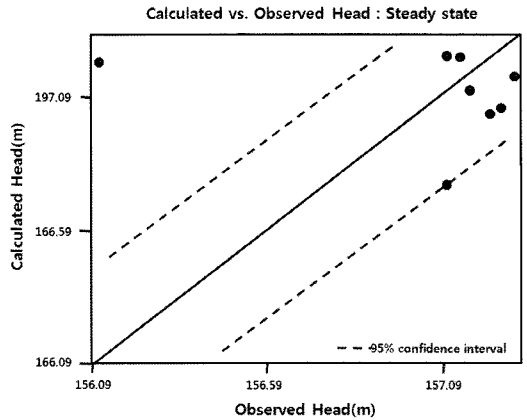


Fig. 9. The comparison results of calculated and observed groundwater head.

물이 이동하는 것을 확인할 수 있었다. 침출수가 누출된 240일이 경과한 후 오염물질인 침출수가 KB-2, KB-3, KB-3A, KB-6에 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 모델링 결과는 수질 분석 및 전기비저항 모니터링 결과 얻어진 지하수에 대한 침출수의 영향을 보여주는 KB-2, KB-3, KB-3A, KB-6를 포함하는 확산범위와 대략 일치함을 알 수 있다(Fig. 11). 연구지역의 수질 분석결과 침출수의 영향이 KB-06보다 하류부에서는 나타나지 않고 있으며, 따라서 오염물 이동 모델링 결과 침출수의 누출은 1년 이내에 발생한 것으로 사료되며, 아울러 오염물질 이동 모델링 결과는 현재 매립장의 수질측정값과 수질검증 결과와 비교적 잘 일치하므로 침출수 영향 경로가 잘 모사되었다고 판단할 수 있다.

침출수의 누출은 매립지 매립 현황을 볼 때 위생매립이 실시된 후 상당 기간이 지나고 최근에 침출수 유출이 일어났음을 예상되었으며 이는 앞 절에서 언급하였던 위생매립지 하부에 설치된 침출수 관로나 차집정이 탄산염광물의 침전에 의한 막힘 현상이나 부등 침하에 의한 파손 등의 여러 가지 요인에 의하여 손상되었을 가능성이 높다고 예상할 수 있다. 모델링 예측 결과를 보면 현재 침출수의 영향이 매립지 하류부로부터 100 m 내외로 나타나 주변 인삼밭이나 인가까지 영향을 미치고 있고 2년 정도의 시간이 경과하면 지하수 흐름방향으로 침출수의 영향경로가 확대되어 주변에 많은 영향을 줄 것으로 예측되었다. 따라서 침출수의 누출을 방지하기 위한 차수벽 보완 및 침출수 집수정 부근에서 양수 등을 통한 침출수 처리 시설을 설치하여 매립지의 유지보수 및 관리가 필요할 것으로 판

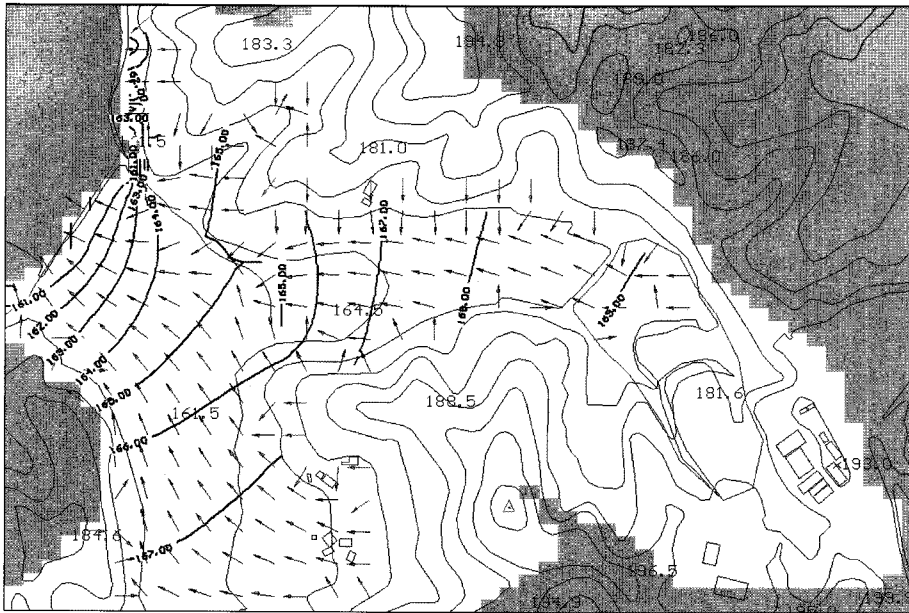


Fig. 10. The equipotential lines and groundwater flow in the study area

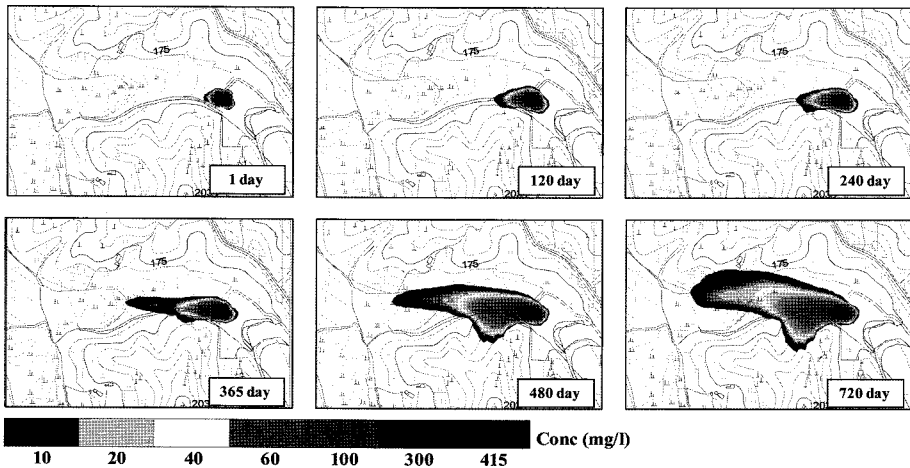


Fig. 11. The prediction results of contaminant plume using MT3D.

단되었다.

5. 결 론

본 연구는 비위생 및 위생 매립이 공존하는 전형적인 생활쓰레기 매립장을 대상으로 매립지역에서 침출수 누출과 이에 따른 주변 지하수 수리지화학적 변화 특성을 파악하여 향후 오염의 확산을 예측하는데 목적을 두고 수행되었다. 수리지화학적 분석 평가 결과 오

래된 비위생 매립지와 현재 매립이 진행 중인 매립지에서 발생하는 침출수는 화학적 조성에 있어 차이를 보여주었다. 연구 결과 매립후 발생하는 침출수는 현재 매립지의 침출수에서 대부분의 성분(Na, K, Mg, Cl, HCO₃)이 높은 값을 나타내었으며 이는 쓰레기의 염류 성분과 미생물 분해의 복합적인 영향에 따른 것으로 조사되었다. 특히 중탄산염이 현재 매립중인 위생매립지 침출수에서 높은 것은 미생물 활동에 의해 분해 가능한 유기물 쓰레기(음식물 등)에 기인하는 것

으로 조사되었다. 매립 쓰레기의 연령과 조성에 따른 침출수 성분의 변화는 향후 불량 매립지의 안정화에 대한 조사시 침출수의 지속적 발생 가능성에 대한 정보를 파악하는데 필요한 정보로 이용될 것이다.

매립지 하류부 좌측 집수정 부근에서 누출되는 침출수의 주변 지하수 수질에 대한 수직적 분포를 평가하기 위해 수질 검층을 수행한 결과 각 시험정(KB-02, KB-03, KB-06)의 지표하 4~12 m 구간에서 침출수의 영향에 따른 전기전도도 증가로 수질변화 양상이 뚜렷하게 나타났다. 전기전도도는 연구지역 지하수 배경값인 226 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에 비해 침출수와 오염지하수에서 최소 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 최대 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 높게 나타났으며, 수질 검층 자료를 바탕으로 침출수 유출범위는 매립지 하류로부터 70-100 m 내외인 것으로 조사되었다. 침출수에 대한 지하수의 영향을 정량적으로 해석하기 위한 주성분 분석과 군집분석 결과 침출수가 매립장 하류부 일부 지하수 수질에 영향을 미치며 배경지하수, 침출수 및 오염된 지하수로 구분되어지는 것을 확인하였다.

다변량통계분석법인 주성분분석을 수행한 결과 초기 3개의 주성분 전체분산의 80% 이상을 설명하였으며 그 중 주성분 1은 침출수의 영향을 나타내었다. 오염 지하수는 주성분 1과 대수층의 지층 특성을 지시하는 주성분 2의 복합적인 영향을 받으며 이는 오염지하수가 침출수와 배경 지하수의 단순 혼합이 아닌 이온교환, 미생물 분해 및 흡착 등의 자연 저감의 영향에 지배됨을 의미한다. 주성분분석과 군집분석 모두 배경 지하수, 오염지하수 및 침출수가 뚜렷하게 구분되어지며 이는 수질성분특성을 이용한 다변량통계분석법이 매립지 주변 지하수의 침출수 영향을 규명하는데 효과적으로 이용될 수 있는 방법임을 보여주었다.

침출수 누출에 따른 오염물질의 주변 대수층에 미치는 영향을 파악하기 위한 이동 모델링 결과 침출수 누출 후 240일의 오염운(Contaminant plume)이 현재 오염을 받는 관측정(KB-02, KB-03, KB-03A, KB-06)을 포함하는 결과와 일치하여 나타난다. 따라서 현재 오염 확산 특성으로 볼 때 침출수의 누출은 1년 이내에 발생한 것을 확인할 수 있었다. 연구지역 매립지의 매립현황을 볼 때 1992년 이후 위생매립이 실시된 후 침출수 누출이 발생하였으며 이는 침출수 차집을 위해 설치된 관로 파손과 집수정의 관리 소홀에 의한 것으로 판단되었다. 따라서 수리지화학적 연구와 모델링 결과를 종합한 결과, 연구지역에서 침출수 누출에 의한 영향은 매립지 하류부로부터 100 m 이내로 국한되어 주변 인삼밭이나 인가에 영향을 미치지 않

나 2년 정도의 시간이 경과하면 오염물질의 확산 및 이동이 확대되어 주변 농경지까지 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서 집수정에서 양수를 통한 침출수의 처리 및 차수벽 설치를 통한 매립지 관리 방안이 수립되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 환경부 토양오염확산방지사업인 “탐사식 조사기법을 이용한 오염부지 현장평가 프로토콜 개발”의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사를 드립니다. 심사과정에서 이 논문의 미비점을 세세하게 지적하여 수정하여 주신 부산대학교 함세영 교수님, 그리고 익명의 두분의 심사위원님께 깊이 감사드립니다.

참고문헌

- Bergamaschi, P., Lubina, C., Konigstedt, R., Fischer, H., Veltkamp, A.C. and Zwaagstra, O. (1998) Stable isotopic signatures ($\delta^{13}\text{C}$, δD) of methane from European landfill sites. *J. Geophys. Res.*, v. 103, p. 8251-8265.
- Bjerg, P. L., Ruge, K., Pedersen, J. K. and Christensen, T. H. (1995) Distribution of redox sensitive groundwater quality parameters downgradient of a landfill (Grindsted, Denmark). *Environ. Sci. Technol.*, v. 29, p. 1387-1394.
- Cha, J.M., Kim, J.-Y., Lee, B.-T. and Kim, K.-W. (1999) Monitoring of stream water and groundwater contamination at the Ilgok landfill site in Kwangju, Korea. *Econ. Environ. Geol.*, v. 32(5), p. 485-493.
- Cheon, S.-H., Koh, D.-C. and Ko, K.-S. (2007) Analysis of aliphatic carboxylic acids using ion-exchange chromatography: Application to groundwater affected by landfill leachates. *J. Kor. Soc. Soil & Groundwater Env.*, v. 12(2), p. 55-64.
- Christensen, T.H., Kjeldsen, P., Albrechtsen, H. J., Heron, G., Nielsen, P. H., Bjerg, P. L. and Holn, P. E. (1994) Attenuation of landfill leachate pollutants in aquifers. *Crit. Rev. Environ. Sci. Tech.*, v. 24(2), p. 119-202.
- Christensen, T.H., Kjeldsen, P., Bjerg, P.L., Jensen, D.L., Christensen, J.B., Baun, A., Albrechtsen, H.-J. and Heron, G. (2001) Biogeochemistry of landfill plumes. *Appl. Geochem.*, v. 16, p. 659-718.
- Chung, S.-Y. (1995) Groundwater contamination at the Seokdae waste landfill area of Pusan city. *J. Kor. Soc. Soil & Groundwater Env.*, v. 2(1), p. 1-8.
- Davis, J. A., Fuller, C. C., Coston, J. A., Hess, K. M. and Dixon, E. (1993) Spatial heterogeneity of geochemical and hydrologic parameters affecting metal transport in ground water. EPA Environmental Research Brief, EPA/600/S-93/006, Robert S. Kerr Evn., Res. Lab., Ada, OK, USA.
- Environment and Pollution Research Group (2001) The

- survey of landfills and the development of monitoring methods. 45p.
- HANS Engineering Inc. (1994) The report of hydrogeology and stabilization design of Nanji landfill. 498p.
- Heaton, T.H.E., Trick, J.K. and Williams, G.M. (2005) Isotope and dissolved gas evidence for nitrogen attenuation in landfill leachate dispersing into a chalk aquifer. *Appl. Geochem.*, v. 20, p. 933-945.
- Heron, G., Bjerg, P.L., Gravesen, P., Ludvigsen, L. and Christensen, T.H. (1998) Geology and sediment geochemistry of a landfill leachate contaminated aquifer (Grinsted, Denmark). *J. Contam. Hydrol.*, v. 29, p. 301-317.
- Jeon, S.-K., Koo, M.-H., Kim, Y. and Kang, I.-O. (2005) Statistical analysis of aquifer characteristics using pumping test data of national groundwater monitoring wells for Korea. *J. Kor. Soc. Soil & Groundwater Env.*, v. 10(6), p. 32-44.
- Kim, D.-W., Park, S.-W., Lee, J.-Y. and Lee, P.-K. (2001) A study on the extent of the pollution of an illegal landfill. *J. Kor. Soc. Soil & Groundwater Env.*, v. 6(2), p. 31-38.
- Lee, C.-H. and Hahn, J.-S. (1996) The contamination characteristics of the Nanji uncontrolled landfill and its surrounding hydrogeologic environment. *J. Kor. Soc. Groundwater Env.*, v. 3(1), 27-36.
- Levine, A.D., Harwood, V.J., Cardoso, A.J., Rhea, L.R., Nayak, B.S., Dodge, B.M., Decker, M.L., Dzama, G., Jones, L. and Haller, E. (2005) Assessment of biogeochemical deposits in landfill leachate drainage systems. Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management, Report #033206-05.
- Ludvigsen, L., Albrechtsen, H.-J., Heron, G., Bjerg, P.L. and Christensen, T.H. (1998) Anaerobic microbial processes in a landfill leachate contaminated aquifer (Grinsted, Denmark). *J. Contam. Hydrol.*, v. 33, p. 273-291.
- Manning, D.A.C. (2001) Calcite precipitation in landfills: an essential product of waste stabilization. *Mineral. Mag.*, v. 65(5), p. 603-610.
- Oh, S.-Y. and Chon, H.-T. (1996) Characteristics of groundwater pollution and contaminant attenuation at waste disposal sites. *J. Kor. Soc. Groundwater Env.*, v. 3(1), p. 37-49.
- Park, J.-K., Kim, T.-D., Choi, D.H. and Lee, J.-Y. (2007) Evaluation of groundwater quality characteristics around uncontrolled closed valley landfill. *J. Kor. Soc. Soil & Groundwater Env.*, v. 12(3), p. 75-80.
- Park, S.-K., Kim, J.-H., Yi, M.-J. and Ko, K.-S. (2006) Pollution detection of the leachate by resistivity monitoring. *Geotech. Eng. Mag.*, v. 54(5), p. 22-24. (in Japanese)
- Scholl, M.A., Cozzarelli, I.M. and Christensen, S.C. (2006) Recharge processes drive sulfate reduction in an alluvial aquifer contaminated with landfill leachate. *J. Contam. Hydrol.*, v. 86, p. 239-261.
- Schwarzenbach, R. P. and Westall, J. (1981) Transport of nonpolar organic compounds from surface water to groundwater. Laboratory sorption studies. *Environ. Sci. Technol.*, v. 15, p. 1360-1367.
- Son, J.-S., Kim, J.-H., Yi, M.-J. and Ko, K.-S. (2005) Case study on the investigation of leachate contamination from waste landfill using electromagnetic and magnetic methods. *Geophys. Prospect.*, v. 8(2), p. 137-144.
- Stetzenbach, K.J., Farnham, I.M., Hodge, V.F. and Johannesson, K.H. (1999) Using multivariate statistical analysis of groundwater major cation and trace element concentration to evaluate groundwater flow in a regional aquifer. *Hydrol. Process.*, v. 13, p. 2655-2673.
- van Breukelen, B.M. and Griffioen, J. (2004a) Biogeochemical processes at the fringe of a landfill leachate plume: potential for dissolved organic carbon, Fe(II), Mn(II), NH₄, and CH₄ oxidation. *J. Contam. Hydrol.*, v. 73, p. 181-205.
- van Breukelen, B.M., Griffioen, J., Rilling, W.F.M. and van Verseveld, H.W. (2004b) Reactive transport modeling of biogeochemical processes and carbon isotope geochemistry inside a landfill leachate plume. *J. Contam. Hydrol.*, v. 70, p. 249-269.
- van Breukelen, B.M., Rilling, W.F.M., Groen, J., Griffioen, J. and van Verseveld, H.W. (2003) Biogeochemistry and isotope geochemistry of a landfill plume. *J. Contam. Hydrol.*, v. 65, p. 245-268.
- Ward, J.H. (1963) Hierarchical grouping to optimize an objective function. *J. Am. Stat. Assoc.*, v. 58, 236?244.