자원환경지질, 제40권, 제4호, 419-443, 2007
Econ. Environ. Geol., 40(4), 419-443, 2007

연안지역 화학공장부지의 부지환경평가를 위한 복합조사기법의 적용

최승진[1,2] · **우남칠**[1]*
[1]연세대학교 지구시스템과학과, [2]광해방지사업단

A Toolbox Approach for the Environmental Site Assessment of a Chemical Plant in a Coastal Area

Seung-Jin Choi[1,2] **and Nam-Chil Woo**[1]*
[1]*Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea*
[2]*Mine Reclamation Corporation, Seoul 110-727, Korea*

Recently, the branch-out of foreign companies into domestic markets through M&A and the opened followed by the Free Trade Agreement(FTA) with America have made the environmental site assessments of specific site more necessary. In this study, through case study of conducting actual environmental site assessment by use of a toolbox approach at a large scale of chemical plant with various contaminants located in a coastal area, the problems of guideline of domestic environmental assessment of soil were complemented. And an efficient and economical assessment was achieved. All six steps such as basic investigation, environmental site history survey, sampling and analysis, installation of monitoring wells and hydrogeological survey, and data interpretation were conducted in this study. All results of document survey, geological lineament analysis, field geology survey of surrounding area, geophysical prospecting of the site, hydraulic conductivity, measurement of groundwater flow rate and direction, sampling and analysis at each step were associated and estimated as an integrated tool box approach. As a consequence of this study, toolbox approaches were very useful techniques for contamination level and site characterization of subsurface media. The given conditions to conduct a basic survey for domestic soil environment assessment of site by use of existing documents, as well as interviews with the owner/manager/user of all adjacent properties and thorough review of all practically reviewable records pertaining to the property and surrounding properties within "Guideline for Soil Environment Assessment" radii are very poor. As a result, the application of toolbox approach in the environment site assessment of site is not only more efficient and economical, but also could be very useful assessment to integrate the soil and groundwater contamination.

Key words : Environmental Site Assessment, Coastal area, Chemical plant, Toolbox approach

최근 국내에서는 외국기업의 국내진출에 따른 M&A, 미국과의 자유무역협정에 따른 시장개방에 따라 부지환경평가(토양환경평가)의 결과를 반영할 필요성이 점차 증가되어 왔다. 따라서 이 연구에서는 연안매립지역에 위치한 대규모 화학공장부지에 대한 실제적인 부지환경평가를 통하여 국내의 토양환경평가 지침의 문제점을 보완하고 효율적, 경제적 평가를 위한 복합적 조사기법들을 이용하였다. 이 연구는 기초조사, 부지현황조사, 시료채취와 분석, 관측정 설치와 수리지질 조사, 자료 분석의 6단계로 진행되었다. 각각의 조사단계에서는 기존자료조사, 선구조분석, 지표지질조사, 지구물리탐사, 시추조사, 수리전도도, 지하수의 유향유속측정, 시료채취 및 분석 결과를 조합하여 복합적으로 해석하였다. 연구결과, 부지환경평가를 위한 이러한 다양한 조사기법들의 적용은 부지의 오염현상, 지하매질에 대한 부지특성화에 매우 효과적이었다. 국내에서는 '토양환경평가 지침'에 의한 기초조사에 있어 기존자료의 이용, 가용한 자료의 보관상태, 평가를 위한 관계자 인터뷰 등에 있어 매우 열악한 여건을 가지고 있다. 따라서 '부지환경평가'를 수행하는데 있어 이러한 복합조사기법의 적용은 더욱 경제적이고 효율적이며, 토양과 지하수오염을 연계하여 평가하는데 있어서도 매우 유용할 것으로 기대된다.

주제어 : 부지환경평가, 연안매립지역, 화학공장, 복합조사기법

*Corresponding author: ncwoo@yonsei.ac.kr

1. 서 론

국내에서는 1990년대에 들어서면서 지하수, 토양 등 관련법이 제정되어 지하수와 토양오염 유발시설의 관리 및 오염된 부지에 대한 정화의무가 강화되고 있다. 지하수법은 1993년 12월 지하수의 적정한 개발과 효율적인 보전관리와 지하수오염 예방을 주요 목적으로 제정되었다. 그리고 1995년 1월 토양오염으로 인한 환경상의 위해를 예방하고 토양 생태계의 보전을 위하여 오염된 토양을 정화하는 등 토양을 적정하게 관리보전하기 위하여 토양환경보전법이 제정시행되었다. 이러한 양대법을 바탕으로 지하수 및 토양오염지역에 대한 본격적인 조사와 오염부지에 대한 정화사업을 시행할 수 있는 종합적인 부지환경관리의 계기가 마련되었다(Park, 2003). 우리나라의 토양환경보전법은 네덜란드에 이어 세계 두 번째의 단일법이었지만, 그 후 시행과정을 거치면서 조사체계의 미흡, 원인자 책임 한계의 모호함과 재원의 미비 등으로 인하여 토양오염조사 및 정화가 적극적으로 이루어지지 못하는 등 다양하고 복잡한 토양오염문제를 종합적으로 다루기에 미흡하다는 지적이 제기된 바 있다 (Lee, 2006).

토양과 지하수의 오염현상이 육안에 쉽게 확인되지 않고 또 그 피해가 쉽게 인지되지 않는 지질매체이기 때문에, 지표수의 오염 또는 대기의 오염 등 육안으로 보이거나 피부로 직접 느낄 수 있는 오염 현상에 비해서 상대적으로 관심이 낮은 편 이었다(Nathanail and Earl, 2001). 토양과 지하수는 한 번 오염되면 이를 정화하고 치유하기에 막대한 비용과 많은 시간이 소요된다(Day *et al.*, 1997; Cynthia *et al.*, 1997; Albert *et al.*, 1998; EPA, 2000; MOE, 2002; Sparks, 2003). 최근 이러한 부지오염문제가 환경현안으로 대두되고 있으며 이에 대한 관심도가 높아지고 있는 추세이다.

2005년 토양측정망이 운영되는 전국 3,683(전국망 1,500개, 지역망 2,183개) 지점의 토양오염도를 조사한 결과 총 61개 지점인 1.7% 만이 토양오염 우려기준을 초과했고, 이 중 26개 지점(43%)은 토양오염 대책기준을 초과한 것으로 나타났다(MOE, 2006). 또한 지하수 수질측정망이 운영되는 전국 2,021개 지점에서 3,865개 시료를 채취하여 분석한 결과 212개 시료(5.5%)가 지하수 수질기준을 초과한 것으로 나타났다. 특히 공업단지, 폐기물매립지 등의 오염우려지역에서는 7.1%의 기준 초과율을 보였으며, 농림지역, 자연환경보전지역 등 일반지역에서는 4.4%가 기준을 초과한 것으로 나타났다(MOE, 2006).

특히 토양오염의 경우, 2006년도 국가산업단지에 대한 토양환경조사 결과 창원국가산업단지의 경우 토양오염우려기준 초과율 7.3%, 여수국가산업단지 4.3%에 비해 매우 낮은 수준(MOE, 2007)이다. 그러나 이것은 국내의 청정한 토양환경을 대변 하는 것이기 보다는 그 시행방법이나 조사기법상의 문제가 내포되어 있음을 보여준다.

토양이 오염되면 당연히 지하수의 오염을 예측할 수 있지만 현재 국내에서 제도적으로 부지에 대한 환경평가는 "토양환경평가"라는 용어로 한정되어 토양오염에 대한 조사방법과 처리사항만을 규정하고 있다. 물론 토양오염지역에 대한 부지환경평가를 함에 있어 지하수 조사 항목을 포함할 수 있다고 규정하고 있지만 이는 의무사항이 아니다. 그러므로 토양환경 평가자는 환경문제가 곧 의뢰자(업체)의 비용부담으로 이어지는 현실에서 토양에 비하여 오염물질의 확산성이 큰 지하수를 자발적으로 평가할 가능성은 매우 낮다.

한편, 산업화와 더불어 오염지역의 증가에 대비한 처리기술개발과 효율적 처리 방안 도출 및 오염확산 방지를 위해 지질환경의 특성을 반영하는 부지특성화 평가기술의 개발이 필연적이다(EPA, 2006). 즉 지질 및 토양환경 그리고 기후요인 등의 차이로 인하여 국내 토양오염부지에 대한 처리 및 확산방지에 선진국 부지환경평가기술의 단순한 적용은 적합하지 않다. 나아가 불균질한 지질환경 특성을 반영하는 부지특성화 평가기술 개발 및 적용에 있어 오염지역의 경제적효율적 처리 및 확산방지 방안에 대한 도출이 필요하다. 따라서 국내의 토양특성 및 지질환경의 특성을 반영한 오염부지의 특성화 기술의 연구, 개발, 현장 조사기법의 개발이 시급히 요구된다.

국내에서 토양환경성평가는 그 시행역사가 매우 짧고, 또한 사회적 파장을 고려한 환경문제의 노출을 기피하는 사회적 현상으로 인하여 제도의 정착이 늦어지고 있다. 최근, 오염된 부지를 정화하기 위한 실험적 평가와 방법들이 다양하게 시도(Mercer and Spalding. 1991; Kim, 2001)되고 있으나, 정화에 앞서 정확한 오염범위와 오염특성파악을 위한 복합적이며 체계적인 접근방법이 절실히 요구되고 있다. 특히 실험실이 아닌 현장에서의 시험 및 적용성 확보를 위한 연구가 부족한 것이 사실이다. 따라서 이 연구는 연안매립지역에 위치한 S화학공장 부지에서 다양한 토양 및 지하수 관련 조사기법들을 적용하여 오염특성, 오염원인 및 오염물질의 거동특성을 파악하고, 각 기법들의 장단점 평

가를 통해 부지환경성평가(토양지하수오염)를 위한 최적기법을 도출하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1. 연구지역

연구지역인 S공장 부지는 1973년 해안 일부를 매립하여 조성되었으며, 해안매립지역은 대부분 해성 점토층으로 이루어져 있다. 반면 공장부지 남측은 과거 농경지로서 육성점토, 매립지층, 풍화대 및 기반암으로 구성되어 있다. 상부 매립토는 매우 불균질한 지반 특성을 나타내고 있다. 부지의 조성면적은 약 93,300 m^2으로서 육지부가 약 69,600 m^2, 해면부가 약 23,700 m^2이며 조성된 부지 중 87,900 m^2가 공장부지로 이용되었다. 대상부지에 설립된 화학공장은 1970년대 후반부터 공장이 운영되기 시작하였다.

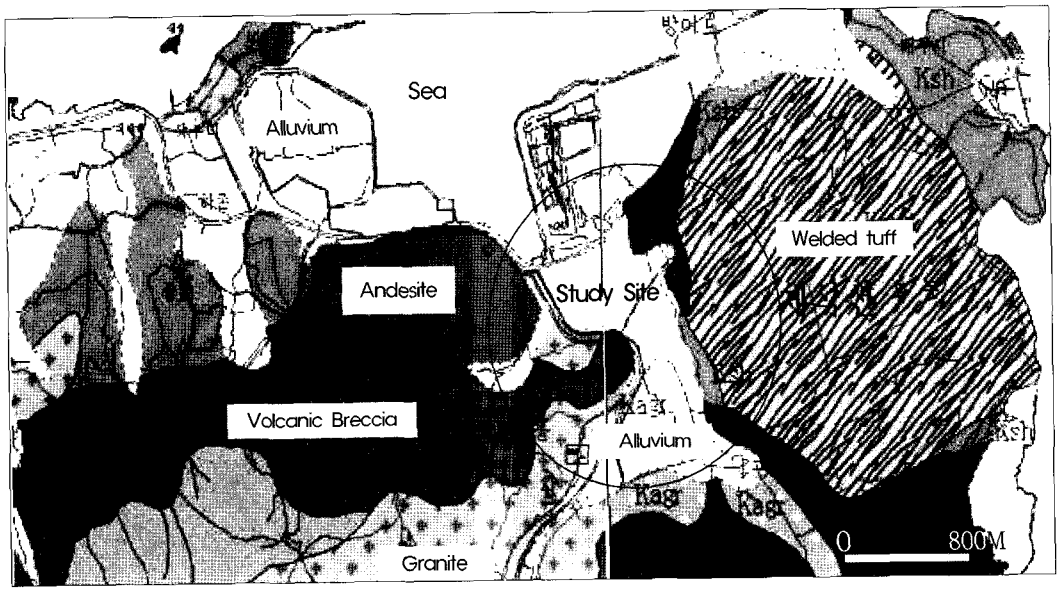


Fig. 1. Geological map of the study area(modified from http://geoinfo.kigam.re.kr).

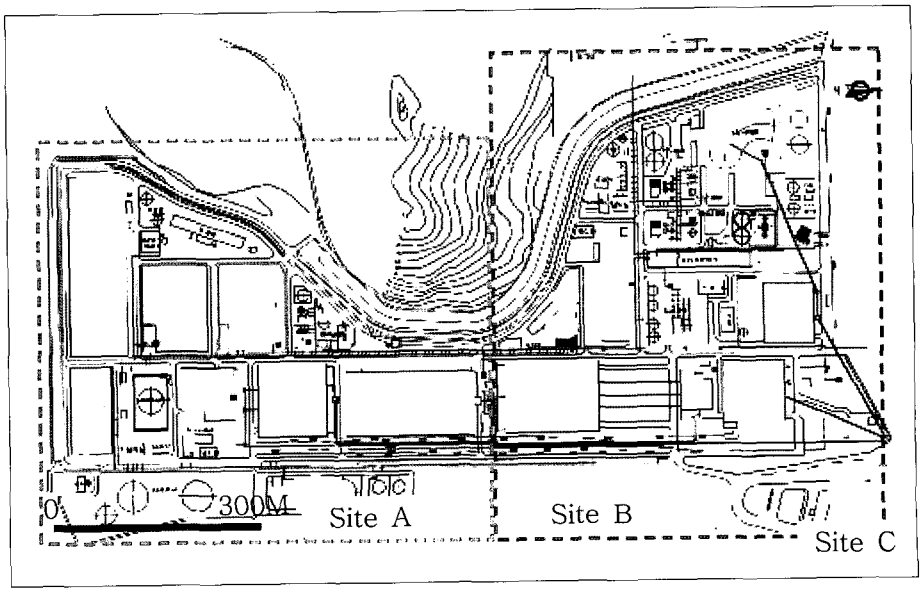


Fig. 2. Sectional map of the study area based on pollution potential of the plant activities and products.

공장부지 주변의 산계는 남쪽에서 북쪽으로 가파른 계곡을 형성하고 있으며, 소규모 하천이 조사지역을 관류하여 북측의 만으로 유입되고 있다. 하천은 공장부지 조성당시 부지의 남서측에서 북동방향으로 유입되던 것을 부지 조성 과정에서 현재와 같이 부지 서측을 경계로 인근의 T공장과의 사이를 가로지르며 흐르도록 유로가 변경되었다. 따라서 연구지역 공장부지 지표면 아래에는 일부 구 하상이 분포하고 있어 지하수의 주된 이동통로 역할을 할 것으로 예상되며, 이에 따라 지하수 및 오염물질의 거동특성이 주변지역에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

부지 및 주변지역은 중생대 백악기의 경상분지에 속하며, 일부에 화산암류가 분포하고 있다(Fig. 1). 연구지역 주변에 일부 노출되어 있는 기반암에서 측정한 절리 구조는 크게 N60°E와 N30°W의 두 방향의 주향을 나타내고 있으며 경사는 10°~20°S 또는 SE방향으로 완만하게 나타난다. 해당 부지에 대한 지질조사 결과, 공장 부지는 충적층의 심도가 대체로 두터우며 투수성이 매우 낮은 논흙 또는 해성점토로 구성되어 있다. 따라서 오염물질이 지하로 이동하여 지하 심부까지 영향을 미칠 가능성은 낮은 것으로 판단된다.

S공장부지에서의 화학공정, 생산제품의 특성 및 부지 이용도에 따라 A와 B의 2개 구역(Fig. 2)으로 구분하여 각 구역별 오염개연성을 파악하고 주변지역에 미치는 환경영향을 평가하였다. 또한 공정특성, 해당구역에서의 환경오염유발시설 및 부지오염 개연성을 고려하여 토양시료를 채취분석하였으며, 지하수조사를 위한 관측정의 설치 위치를 결정하였다. 구역별 공정특성 및 기존자료 분석결과 각 구역은 다음과 같은 일반적 부지 특성을 나타내고 있다.

2.1.1. A 구역

부지의 남쪽 상류부에 위치하며, 부지조성 당시 해안가의 농경지를 매립한 곳으로서 하부 지층은 주로 세립질 점토로 구성되어 있다. 북쪽 해안가의 하류부로 향할수록 해안을 매립하여 조성한 부지지로서 육성기원의 매립토사와 투수성이 매우 낮은 해성점토로 이루어져 있다. 상류부 일부구간은 과거 부지를 매립하기 전에 모래 및 자갈층의 투수성이 매우 양호한 하천이 분포하고 있었으며 이 구간을 따라 양호한 대수층이 형성되어 있다. 이 구역의 부지내에서는 주로 암모니아를 원료로 제품을 생산하는 공장 등이 설치되어 있어 주로 알칼리성 물질을 다루는 곳으로 특징지어진다.

2.1.2. B 구역

부지의 북쪽에 위치하며, 주로 산성물질을 취급하는 곳으로 연구 대상 부지 내에서 가장 오염유발 개연성이 높은 곳이다. 유황야적장과 황산탱크 사이에는 과거 유황을 용융시켰던 시설이 있었으나 현재는 폐쇄된 부지환경 이력을 가지고 있다. B구역의 상류지역은 과거 일부 작은 구릉지를 절토하여 낮은 곳에 매립한 곳으로 부분적으로 기반암의 심도가 얕게 분포하고 있으며 하천방향으로 향할수록 해성퇴적층이 깊어진다. 이 구역에는 주요 원료물질과 폐수처리시설이 배치되어 있고 주로 산성오염물질을 배출하는 구역으로 구분된다.

Table 1. Toolbox approached contents for environmental site assessment in the chemical plant.

Toolbox Items		Contents
Preliminary Investigation	Record review	Analysis of manufacturing process, Facilities lead to soil contamination, Pipeline transferring source materials, Existing drilled data & well, Geology, Aerial photographs, Environmental site history, Periodical data of contamination level, Record of environmental accidents, Review of concerning law
	Site reconnaissance	Condition of ground, Pipe lines, Manufacturing facilities, Underground & aboveground storage tanks, Wastes disposal, Wastewater treatment facilities
	Interview	Environmental accidents, Wastes control, Site history, Management of manufacturing & Pipe lines
Site Prospecting	Geological survey	Surface geological survey near factory site, Structural analysis
	Geophysical survey	Electrical(dipole-dipole) survey, Self potential survey
Sampling & Laboratory Analysis	Soil	Sampling & Logging, Analysis of soil(properties & contaminants)
	Groundwater	Sampling & analysis(contaminants & hydrochemical properties)
	Stream water	Sampling & analysis (contaminants & general chemistry)
Hydrogeological survey & Monitoring	Monitoring well	Installation of Monitoring wells, GPS survey & Altitude leveling
	Hydrogeological survey	Groundwater leveling, Groundwater flow & direction, Slug test
Site Assessment	Assessments	Aerial distribution of contaminants, Property of contaminants, Site characteristics of subsurface media

2.2. 조사방법 및 자료취득

2.2.1. 조사내용

연구지역 공장부지의 특성화(Site Characterization)를 위한 기준 및 절차는 토양환경보전법, 토양오염공정시험방법 및 ASTM(America Standard Test and Material, E 1903-97, 2000; E 1527-97, 1997; E 1903-97, 1997)의 부지환경평가 방법을 참조하여 시행하였다. 조사는 기초조사(문헌조사, 현장답사, 청취조사)를 실시하여 시료 채취 및 분석계획을 수립하고 오염정도, 지층구조, 오염물질 거동에 관한 자료를 수집 분석하였다. 또한 부지 주변의 환경현황과 부지내의 오염도를 조사하기 위하여 토양, 지하수 및 지표수 시료를 채취분석하였다. 공장부지의 전반적인 수리지질학적 특성을 파악하기 위하여 1개 또는 2개의 다심도로 구성된 28개의 관측정을 설치하였다. 또한 일부 토양시료 채취 후 공벽이 유지되어 있는 조사공을 이용하여 지하수위를 측정하였으며, 지하수 흐름 유향유속과 대수층 수리상수를 구하기 위한 슬러그시험을 하였다. 이와 같은 오염 현장의 부지환경평가를 위한 조사내용은 Table 1에 제시하였다. 위의 현장조사 결과는 오염물질의 정화를 위한 비용경제적이며 최적의 기술을 선정하는데 사용된다.

2.2.2. 원격탐사

대상 부지 주변에 대한 전반적인 지질구조를 파악함으로써 지질구조적 특성이 부지 내 지하수 오염체의 유동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 원격탐사자료를 활용하였다. 이 연구에서는 프랑스의 지구관측 위성인 SPOT(System Probatoire d'Observation de la Terre)위성에 의해 촬영된 영상자료를 이용하여 선구조를 추출하였으며, ERDAS사의 IMAGINE S/W 및 수치지형도를 이용하였다.

2.2.3. 지구물리탐사

지구물리탐사는 시추조사, 시료채취 및 분석의 전 단계에 시추 혹은 굴착 없이 간접적으로 충적층 심도, 범위, 지하수 유동경로와 구간 등 부지의 지하매체에 대한 정보를 파악할 수 있는 비파괴적 조사방법(Stewart, 1983; Urish, 1983; Satoru, 2001)이다. 연구 부지는 해안에 인접하여 있어 조석현상에 의한 지하수위의 변동이 예상된다. 또한 다양한 오염물질의 지하수 유입에 따른 전기전도도의 차이에 따라 전기비저항 및 전위차를 나타낼 수 있을 것으로 판단하였다. 이러한 환경적 특성에 따라 전기비저항탐사(쌍극자배열)와 자연전위탐사를 시행하였다. 지구물리탐사 장비는 스웨덴 AGI사의 STING R1을 이용하였으며, 전기

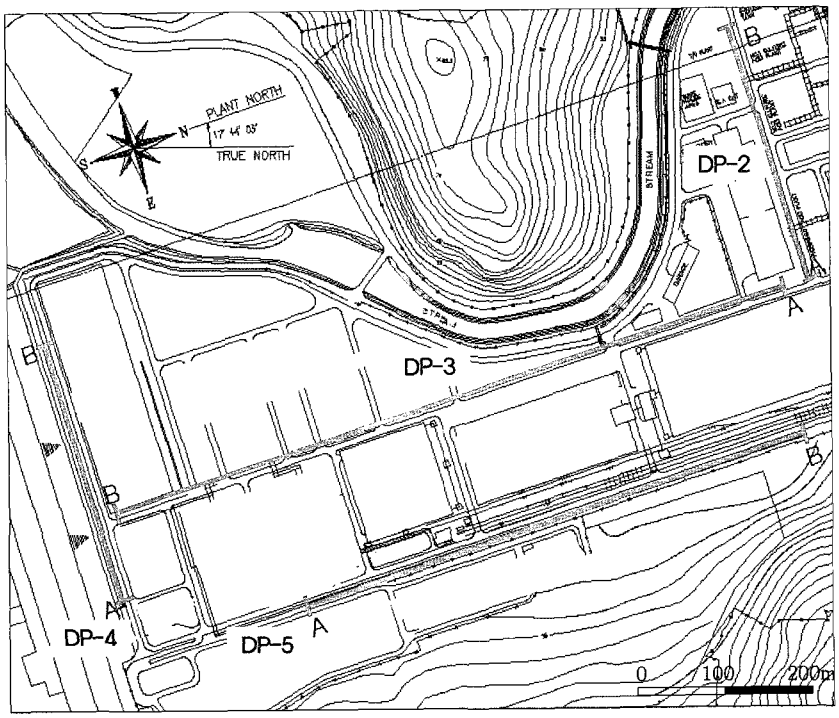


Fig. 3. Electrical resistivity geophysical survey transect in site A.

비저항 쌍극자탐사는 A구역 및 B구역에서 5측선을 실시하였다(Fig. 3, Fig. 4). 쌍극자배열 전기탐사의 자료해석은 DIPRO for Win (Kim, 1999) 역해석 프로그램을 사용하여 지하의 전기비저항을 구하였다.

2.2.4. 시추지질조사

지표에서 수행된 지구물리탐사자료는 연속성을 보이는 자료를 산출하며 비파괴 조사라는 점에서 장점이 있으나, 지하매질의 실체를 보여주지 못한다는 한계를 지닌다. 그에 반해서 시추조사는 지하매질을 뽑아내어 관찰할 수 있는 직접조사 방법으로, 비용은 상대적으로 많이 들지만, 그 결과에 대한 신뢰성은 간접조사 방법에 비하여 확실하다. 따라서 모든 간접조사 방법에 의해 취득된 자료는 시추조사와 같은 직접조사 결과에 의해 검증될 때 보다 정확한 부지특성화에 대한 자료를 얻을 수 있다(Gillham, 1988; Mercer, 1991; EPA, 2006). 이 연구에서 시추조사의 심도는 A, B구역 모두 풍화토사층 상부 또는 불투성층의 역할을 할 것으로 판단되는 해성점토층이 확인되는 심도까지 조사하였다. 시추조사장비는 동력식 Auger drill 장비를 이용하였다. 시추조사공의 위치는 특정토양오염 관리대상시설 주변과 각 단위 공장별 위해물질의 누출 개연성이 높은 곳 그리고 지하수의 흐름 및 오염물질의 거동현상을 파악하기 용이한 곳을 선정하여 총 28개소(A구역 6개, B구역 22개)에 대하여 시행하였으며, 지층내역은 시추과정에서 토출되는 슬라임 및 배수 색깔 등을 확인하여 파악한 후 지질주상도를 작성하였다.

2.2.5. 관측정 설치

지하수관측정은 부지내의 지하수 분포와 오염여부 및 오염물질, 수리지질특성을 파악하기 위하여 A, B구역에 모두 28개의 관측정을 설치하였다. 설치심도는 지층상태에 따라 최소 3.0 m~15.0 m로 하였으며, 그 중 8개소에는 조석에 의한 영향 및 심도와 지층에 따른 수질변화를 파악할 수 있도록 심도를 달리하는 병립관측정을 설치하였다. 관측정 착정시 시추 주상도를 작성하였으며, 이를 검토하여 관측정의 스크린 설치 심도를 결정하고 내부 보호공 자재를 설치하였다. 시추장비는 Auger Drill을 이용하였고 구경 Φ8"~10"의 케이싱 빗트로 풍화대 상부 또는 해성퇴적층의 상부구

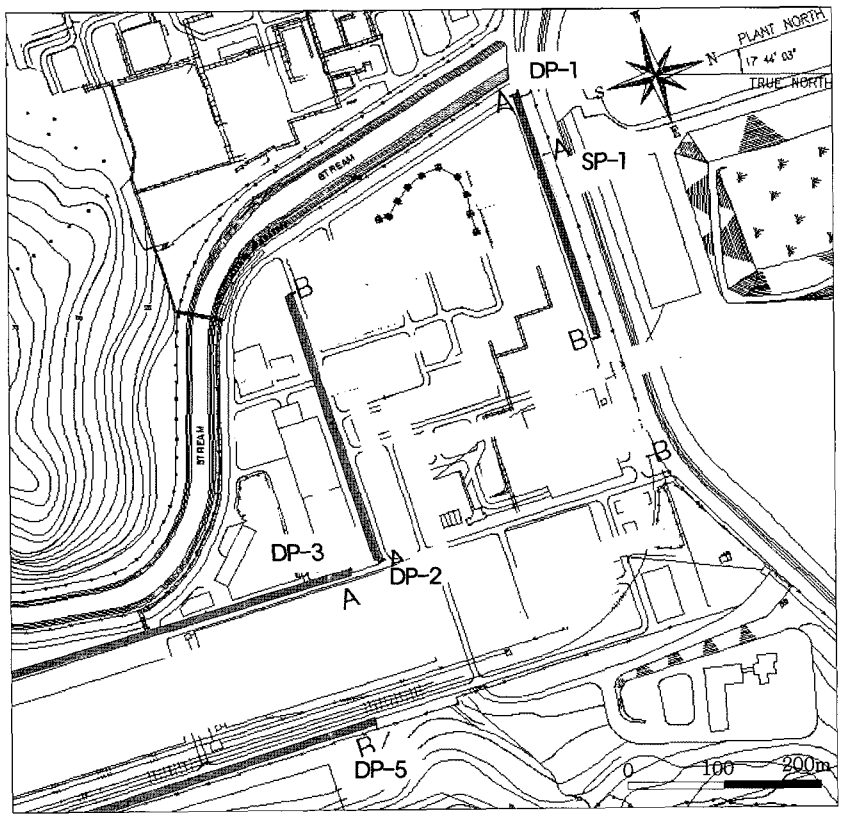


Fig. 4. Electrical resistivity geophysical survey transect in site B.

간 심도 약 3~15 m까지 굴착하였다.

2.2.6. GPS 측위조사 및 수준측량

GARMIN사의 GPSIII Plus를 이용하여 지하수 관측정과 토양시료채취 지점의 위치를 확인하였으며, 이를 위해 GPS(Global Positioning System) 수신기는 Differential-ready Phase Trac12™을 사용하였고, 위성포착시간은 약 15초가 소요된다. 위치의 정확도는 위성 수신상태에 따라 약간의 차이가 있으나, 대체로 1~5 m의 오차범위를 나타낸다. 지하수의 정확한 유동방향을 파악하기 위해, 관측정의 수준측량은 정밀 고저측량을 실시하였다.

2.2.7. 지하수위 조사

부지내의 전반적인 지하수흐름을 파악하기 위하여 우기에 4회, 건기에 1회로 모두 다섯 차례 지하수위를 측정하였다. 또한 조석현상과 해수의 영향을 파악하기 위한 일정기간 모니터링을 부지의 북서측 경계부에 위치한 관측정 MW9와 하구에 인접한 MW12에 대하여 각각 8일에서 22일간 지속적 모니터링을 하여 수위변동자료를 분석하였다. 장기 모니터링은 TD-Diver®(Eijkelkamp사)를 이용하였다.

2.2.8. 지하수 유향유속 측정

설치한 28개의 관측정에서 GeoFlo®(Model 200, K-V associates, INC.)을 이용하여 지하수의 유향유속을 측정하였다. 유향유속계의 프로브(probe)에는 중앙부의 열원과(heat source) 총 4개의 온도소자(thermistor)가 있다. 중앙에 열원이 있고 그를 둘러싸고 4개의 온도소자가 위치하고 중앙에서 열을 가하게 되면 지하수내 등온선이 형성된다. 지하수의 흐름방향으로 온도가 높아지므로 4개의 온도소자는 그 온도 차이를 감지하여 흐름의 방향을 알 수가 있다.

2.2.9. 대수성 시험

이 연구에서는 공장부지의 여건에 따라 순간충격시험(slug test)에 의하여 수리상수를 산출하였다. 순간충격시험 시 사용한 투입물체는 직경 50 mm의 스테인리스 철제 파이프의 양단을 완전하게 밀봉하여 제작한 dummy를 이용하였다. 충적층 구간을 대상으로 한 순간충격시험은 짧은 시간에 수위변화가 발생하므로, 이 연구에서는 자동수위측정기(Diver)를 사용하여 1초 간격의 수위변화를 측정하였다. 순간충격시험은 A구역 및 B구역의 18개 관측정을 대상으로 실시하였으며, 현장에서 얻어진 자료는 AQTESOVE 프로그램(Hydro SOLVE, Inc, Ver.3.0)을 이용하여 Bouwer & Rice 방법과 Hvorslev 방법으로 수리전도도를 산출하였다.

2.2.10. 토양 시료채취 및 분석

이 연구에서 토양시료 채취 지점선정 및 채취방법은 토양환경평가지침에 따라 조사대상 부지를 격자상으로 구분하여 1격자에 1점의 시료채취를 원칙으로 하였으며, 잠재오염원(보양오염 유발물질 저장탱크, 유출가능성, 원료 또는 제품의 이송로, 폐수배출구, 원료물질의 배관라인 등)의 위치에 따라 채취위치를 조정하였다. 시료의 채취는 차량 탑재형 지오프로브(Geoprobe®, Geoprbe Systems사)를 이용하여 표토와 심토(0~5 m) 시료를 채취하였으며, 배관하부 등 지오프로브의 접근이 어려운 지점에는 핸드오거(hand auger)나 부삽을 이용하여 표토(0~30cm)를 채취하였다. 토양시료의 채취는 A구역 17개소에서 84점, B구역 24개소에서 103점, 기타 오염개연성이 있는 구역 13개소에서 17점 등 총 204개의 시료를 채취하였다. 그 외에 대조군과의 오염특성을 비교하기 위하여 4점의 배경시료를 채취하였다(Table 2). 지오프로브를 이용하여 심도별로 채취한 시료는 토성, 색깔, 시료채취시의 관능조사 결과 및 지하수위 분포 상황에 따라 1지점 당 1~11개의 시료로 구분하여 주상도를 작성하였다. 토양색깔의 기재는 "Munsell Color Chart"(GretagMacbeth, 2000Ed.)를 이용하여 측정, 기재하였다. 채취된 토양시료는 실내 또는 실외에서 풍건작업 등을 거쳐 전처리를 하였다.

분석항목은 각 지역의 공정특성에 따라 오염개연성이 있는 항목을 중심으로 분석하였으며, 특정토양오염관리시설로 등록되어 있는 유류 또는 화학물질 저장탱크 주변 지역의 토양은 해당시설에서 보관취급하는 물질을 추가하여 분석하였다. 또한 생산공정 또는 토양오염유발시설에서의 오염개연성이 있는 물질뿐만 아니라 A, B구역에서 각각 2개의 대표지점을 선정하여 토양시료를 채취, 토양환경보전법에서 정하고 있는 법정 오염물질 17개와 토양의 이화학적 특성 등 27개 항목에 대하여 분석하였다(Table 3).

Table 2. Number of soil sampling locations and analyzed sample of the study area.

	Site A	Site B	Out of area site A & B	Pipeline area	Background
Geoprobe(point)	17	22	2	-	-
Hand auger (point)	-	2	3	8	4
No. of sampling	84	103	9	8	4
No. of anlyzed sample	81	103	9	8	4

2.2.11. 지하수 시료채취 및 분석

지하수 시료는 토양시료 채취공 중 지하수 시료채취가 가능한 32지점과 신규 설치된 관측공(MW) 28지점, 그리고 부지 남측의 상류부에서 생활용수로 이용되고 있는 소형관정 2개소에서 배경시료를 채취하였다. 물 시료는 스테인레스스틸 재질의 베일러를 사용하여 채취하거나, 심도별 수질시료를 채취할 필요가 있을 경우에는 소형 수중모터펌프를 이용하여 일정 심도 구간에 설치한 후 시료를 채취하였다. 모든 수질시료 채취 시, 시료채취기는 증류수를 이용하여 3~4회 세척을 한 후 사용하였으며 채취 즉시 현장에서 아이스박스에 보관하여 실험실로 운반한 후 분석 전 까지 냉장보관 하였다.

시료채취 시 수소이온농도(pH), 전기전도도(EC), 온도 및 산화환원전위(ORP) 등은 현장에서 시료채취 후 즉시 측정하여 기록하였다. 유기오염물질 분석용 시료의 여과는 0.1 μm 유리섬유필터(glass fiber filter)를 이용하여 유리병에 채수한 후, 여과된 시료는 4°C이하에서 냉장보관 하였다. 무기이온 분석용 시료는 0.45 μm 멤브레인필터(membrane filter)를 이용하여 여과한 후, 음이온 분석을 위한 시료와 양이온 및 중금속 분석을 위한 시료를 분리하여 보존처리 하였다. 음이온 분석시료는 폴리프로필렌(polypropylene) 재질의 무균채수병에 채수하여 4°C이하에서 냉장보관 하였으며, 양이온 및 중금속 분석용 시료는 HNO_3를 이용하여 pH 2.0 이하가 되도록 산(酸)처리하여 폴리프

Table 3. Analyzed contaminants of soil.

Location of soil sampling	Analyzed Contaminants
Site A & B	T-N, CN^-, pH, EC, Cation(Ca, Mg, Na, K), Anion(F^-, Cl^-, NO_3^-, SO_4^{2-}), Heavy metals(Cr^{6+}, Cd, Pb, Zn, Cu, Ni), KCl-extracted N(Urea, NO_3^-, NH_4^+), P, BTEX*, TPH*, F*
Representative points & background sample	CEC, Soil texture classification, Total organic carbon, Organophosphorus Compounds, pH, Cation(Ca, Mg, Na, K), Anion(F^-, Cl^-, NO_3^-, SO_4^{2-}), P, T-N, CN^-, Heavy metals(Cr^{6+}, Cd, Pb, Zn, Cu, Ni, As, Hg), F, PCB, TCE, PCE, Phenol

Table 4. Analyzed contaminants of groundwater and surface water.

Location of Water Sampling	Analyzed Contaminants
Groundwater in soil boring hole	pH, EC, P, Cd, Pb, Ni, Cu, Zn, Al, Fe, Mn, Cation(Mg, K), Anio(F^-, Cl^-, NO_3^-, SO_4^{2-}), Alkalinity
Groundwater in Monitoring Well	pH, EC, P, Cd, Pb, Ni, Cu, Zn, Al, Fe, Mn, Cr, As, Hg, Organophosphorus Compounds, TCE, PCE, 1.1.1 Tri- chloroethane , BTEX, TPH, CN^-, Phenol, Cation(Mg, Ca, K), Anion(F^-, Cl^-, NO_3^-, SO_4^{2-}), Alkalinity
Surface water	pH, EC, P, Cd, Pb, Ni, Cu, Zn, Al, Fe, Mn, Cation(Mg,K), Anio(F^-, Cl^-, NO_3^-, SO_4^{2-})

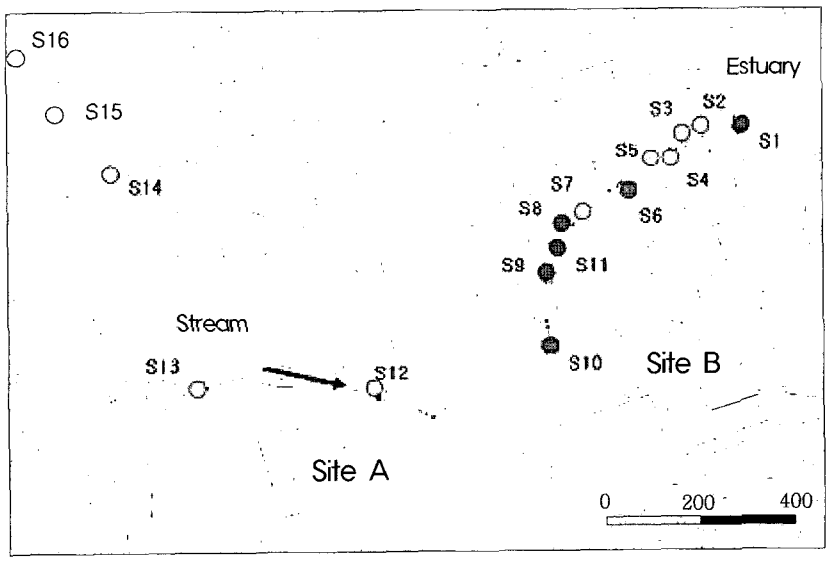


Fig. 5. Stream water sampling location.

로필렌 시료병에 담아 보관하였다. 지하수 관측정의 지하수는 공업용수 수질기준 항목과 알칼리도(Alkalinity) 등 30개 항목을 분석하였으며, 토양시료 채취공에서 채수한 지하수는 시료의 양이 적어 주요 항목 18개에 대하여 분석을 시행하였다(Table 4).

2.2.12. 지표수 시료채취 및 분석

지표수 시료는 조사대상 화학공장의 산업활동에 의한 하천수 수질변화를 관찰하기 위하여 공장 외곽지역을 흐르는 인근 하천의 유역상류에서 하류부의 하구까지를 대상으로 하였다(Fig. 5). A구역은 B구역보다 하천의 상류부에 위치하며, 공장부지에 인접해 있는 하천은 만조 시 공장부지의 A, B구역 경계부까지 조수에 의한 영향을 받고 있다.

채취된 시료의 pH는 현장에서 측정하고 실험실 분석을 위하여 유리병에 담아서 시험실로 이송하였다. 이송된 시료는 0.45 μm membrane filter를 이용하여 여과하였으며 일부는 중금속 분석을 위하여 HNO_3을 첨가하여 폴리프로필렌 재질의 시료병에 냉장보관(4°C)한 후 기기분석을 수행하였다. 지표수 분석항목은 토양시료채취 지점에서 채수한 지하수 분석항목에서 Alkalinity를 제외한 17개 항목을 분석하였다(Table 4). 시료는 수질오염공정시험법에 따라 분석하였다.

토양과 물 시료의 분석은 한국농촌공사 환경연구실을 이용하였으며, 일부 시료변질 등의 우려가 있는 항목 및 시급한 분석을 요하는 항목에 대하여는 연구지역 화학공장 내 분석실을 이용하여 분석하였다. 시료분석을 위한 품질보증 및 관리는 토양오염 공정시험법, 수질오염 공정시험법 및 미국 환경청(US EPA, 1994)의 QA/QC (Quality Assurance/Quality Control) 방법을 준용하였다.

3. 연구 결과 및 토의

3.1. 원격탐사 해석

조사지역에서는 7개의 선구조가 확인되었으며, 이 중 선구조 L-1은 조사지역에서 남서부 방향의 주계곡을 약 7 km까지 이어져 있고, 단층작용에 의한 선구조로 해석된다(Fig. 6). 그러나 다른 6개의 선구조(L-2~L-7)는 연장 약 0.4 km~3.5 km로 비교적 짧게 나타나며 L-1과는 다른 다양한 암종의 암질경계부에 의한 선구조로 해석된다(Table 5).

3.2. 지구물리탐사

A구역에서 전기비저항 쌍극자탐사는 3측선(DP-3, DP-4, DP-5)을 실시하였다(Fig. 3).

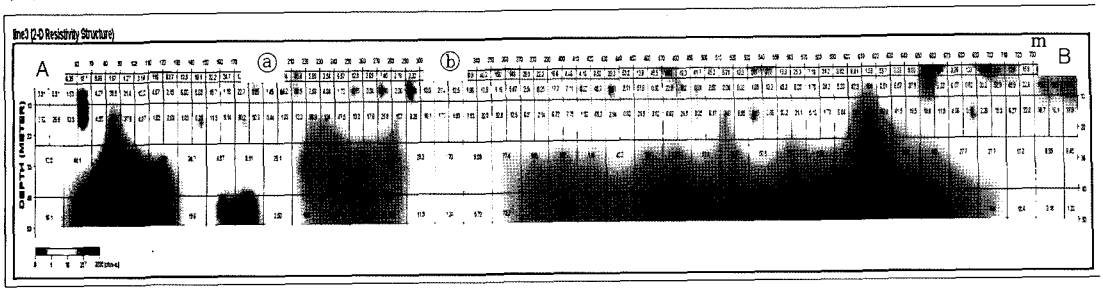
DP-3 측선의 전기비저항분포 해석결과 비교적 고비저항값을 나타내는 기반암의 심도는 남쪽의 공업용수 저수지(Raw Water Pond)에서 북쪽 방향으로 향할수록 다소 깊게 나타나고 있으며 낮은 전기비저항대를 나타내는 이상대 구간 또한 발달되어 있다(Fig. 8A). 특히 시점부에서 약 180 m지점(Line DP-3 ⓐ), 관측정 MW15 부근의 지표하부에는 매우 낮은 전기비저항 분포를 나타내는 구간이 발달되어 있다. 이 구간은 시추조사에 의한 지질조사자료 검토결과 과거 부지 조

Fig. 6. Lineament map near the study area by SPOT image.

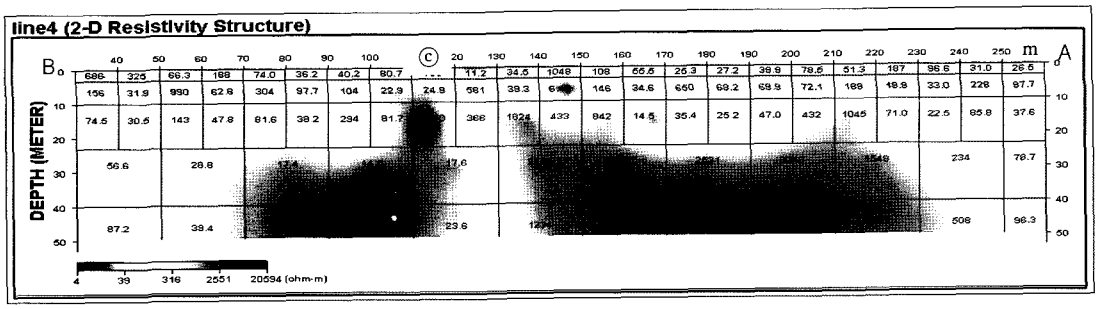
Table 5. Major structural lineaments near the study area.

Lineament	Direction of Lineament	Continuity	Geological Aspects
L-1	N19E	7km	Fault zone
L-2	N62E	3.5km	Boundary of Rock Facies
L-3	N34W	1.6km	Boundary of Rock Facies
L-4	N63E	1.6km	Fault zone/Boundary of Rock Facies
L-5	N56E	0.5km	Boundary of Rock Facies
L-6	N47E	0.7km	Fault zone/Boundary of Rock Facies
L-7	N66E	0.3km	Fault zone/Boundary of Rock Facies

(A) Line DP-3



(B) Line DP-4



(C) Line DP-5

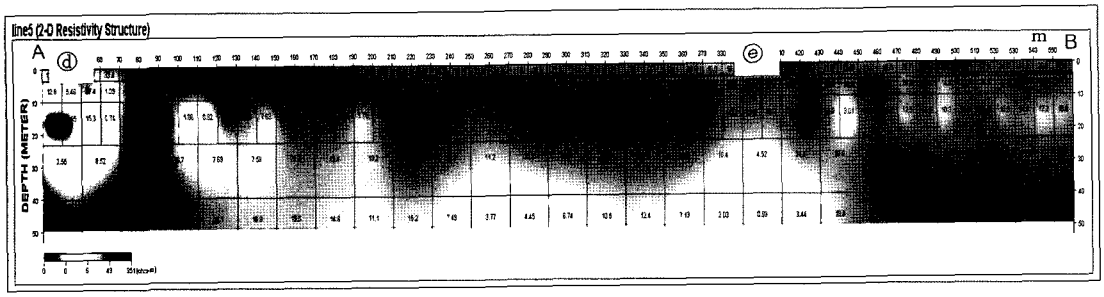


Fig. 7. 2-D Resistivity structure of geophysical survey lines in site A.

성당시 자갈층으로 이루어진 구하상이 위치하고 있었던 지역과 일치하는 결과를 나타낸다. 따라서 이 구간으로 주요 지하수 유로가 형성되어 있을 가능성이 높은 것으로 해석된다. 또한 DP-3 단면도의 ⓑ지점은 Fig. 6의 선구조도 해석결과에 따른 선구조(Line-4)의 연장선상에 놓이는 부분으로 지구조적 작용에 의한 연약대로서 저비저항의 이상대를 나타내고 있는 것으로 판단된다.

DP-4 측선은 공장부지 남단에서 공업용수 저수지(Raw Water Pond) 둑을 따라 하천 방향으로 측선배열을 하여 전기비저항 분포대를 파악하였다. 전기비저항탐사 자료 해석결과 측선의 시점부에서 중간지점까지는 비교적 낮은 전기비저항분포(Line DP-4 ⓒ)를 나타내고 있다(Fig. 7B). 그러나 Pond의 둑을 따라 하천 방향으로의 일부 구간 심도 20 m 하부로 부터는 비교적 높은 전기비저항 분포를 나타내고 있어 고비저항대의 기반암층이 존재하기 때문인 것으로 해석된다.

DP-5측선(Fig. 7C)은 부지 남동측 부지경계부에 위치한 요소(urea) 생산 공장을 기점으로 부지의 동측경계를 따라 북측으로 연결되는 곳으로 590 m의 측선을 배열하여 물리탐사를 시행하였다. 이 부분은 과거 부지조성당시의 조사자료 검토 결과에 의하면 산사면의 말단부에 위치한 곳으로 대부분 표토와 일부 기반암을 제거하여 조성된 것으로 확인된다. 따라서 공장부지의 대부분을 농경지나 해안을 매립하여 조성된 곳과 비교해 볼 때 기반암의 심도가 매우 얕은 결과를 나타내고

있다. DP-5 측선 상에서 특히 낮은 전기비저항 분포를 나타내는 구간은 측선 시점부의 얕은 심도에 이상대 구간(Line DP-5 ⓓ)이 인지된다(Fig. 7C). 이는 지표에 공장 냉각탑이 위치한 지역으로써 이 구간 역시 냉각수의 누수에 의한 영향을 반영하는 것으로 해석된다. 또한 측선 시점부에서 약 400 m 지점의 탐사 해석 단면도 심부에서 나타나는 전기저비저항 분포 구간은 기반암에 발달되어 있는 단층 또는 암질 경계부의 연약대를 따라 지하수에 의해 포화되어 있기 때문인 것으로 판단된다(Line DP-5 ⓔ). 이러한 증거는 탐사측선 DP-3의 측점 약 180 m지점과의 동서 방향으로 연결되는 저비저항대와 일치하는 점과 또한 위성영상자료에 의한 선구조자료 해석결과(Fig. 6, Table 5)에서 나타나는 L-4 선구조의 위치 및 방향과 일치하는 것으로 유추할 수 있다.

B구역에서 물리탐사는 공장부지 북단 담장을 따라 전기비저항(쌍극자배열)탐사 2측선(DP-1, DP-2)과 자연전위탐사(SP-1) 1측선을 시행하였다(Fig. 4). 탐사결과, 전기비저항 해석단면도를 보면 지표하부 15 m 이상의 심도에서 20 Ωm 이하의 낮은 비저항값을 나타내는 곳은 하천 방향의 시점부 0~20 m(Line DP-1 ⓕ), 105~115 m(Line DP-1 ⓖ), 225~230 m(Line DP-1 ⓗ)구간이다(Fig. 8B). 동일 구간의 자연전위탐사 결과에서 전위차는 다른 구간에 비하여 상대적으로 낮은 전위 값을 나타내고 있어 쌍극자탐사 해석결과와 같은 양상을 나타내고 있다(Fig. 8A). 특히 DP-1측선의 해석단면도에서 ⓕ와 ⓖ지점은 공장부지 북측 담장과 인접한 부지 안쪽으로 각각 유황탱크와 석고수 적재 시설이 위치하여 부지내 관측정에서 측정한 지하수의 전기전도도가 높은 지점에 일치한다. 또한 ⓖ와 ⓗ지점 사이의 구간은 부지외부의 석고적치장으로 이송되는 석고폐수의 관로가 매설되어 있다. 환경오염지역에서 전기전도도와 전기비저항의 관계는 각종 환경물리탐사의 적용에 있어서 상관관계가 있는 것으로 보고되고 있다

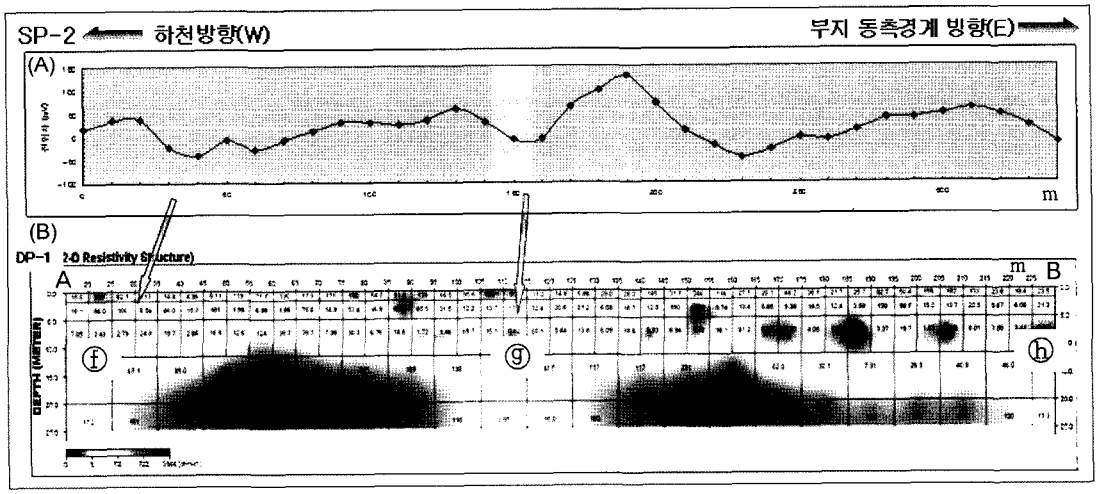


Fig. 8. Interpretation result of self-potential survery line SP-2 and 2-D resistivity structure of geophysical survey line DP-1 in the site B.

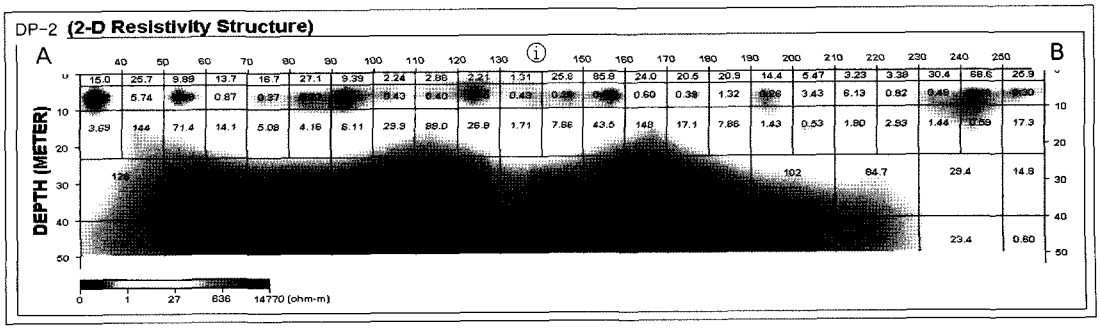


Fig. 9. 2-D resistivity structure of geophysical survey line DP-2 in the site B.

(Hinze *et al.*, 1990; Kim and Shon, 1994; Chang *et al.* 1998; Son *et al.*, 2005). 따라서 이러한 구간은 부지내 전기전도도가 높은 지하수의 유동에 따른 결과로 판단된다.

DP-2측선의 전기비저항탐사는 인산공장 부근에서 하천방향(E-W)으로 총 290 m의 측선을 배열하여 시행하였다. 탐사자료 해석결과 기반암으로 해석되는 500 Ωm 이상의 고비저항대와 퇴적층 구간으로 판단되는 30 Ωm이하의 낮은 전기비저항 분포대가 뚜렷이 구분된다(Fig. 9). 해석 단면도에서 기반암의 심도는 동쪽에서 서쪽으로 향할수록 지하 15~20 m 정도로 다소 깊게 분포하고 있다. 이는 시추조사에 의해 확인된 결과 및 공장설립시의 시추지질조사자료와 일치하고 있다. DP-2 측선에서 B방향의 종점부에서는 매우 깊은 심도까지 비교적 낮은 전기비저항대가 분포하고 있다. 이 부근은 기반암이 깊고 두터운 충적층이 분포하고 있는 것으로 시추에 의해 확인되었으며, 인근 하천의 제방에서 침출되는 산성의 용출수(pH 4.48)에서도 비교적 높은 전기전도도값(680 μs)인 산성을 나타내어 양호한 지하수의 흐름이 비교적 양호하여 지하수의 유동이 양호한 투수성 지층이 매우 두텁게 분포하고 있을 것으로 판단된다.

3.3. 시추지질조사

A구역은 과거 농경지로 사용되었던 부지를 매립하여 조성한 부지로서 6개소에서 관측정 설치와 함께 시추조사를 하였다(Fig. 10). 이 밖에 공장부지 조성당시에 작성된 기존 지질조사자료를 이용하여 지질단면도를 작성하였다. A구역 부지 내 지질은 공장 남측의 경우 매립층, 논토양, 하상퇴적층, 풍화잔류토 및 풍화암으로 구성되어 있다(Fig. 11). 충적층의 두께는 하천방향으로 향할수록 두껍게 나타난다. 주로 사력으로 구성된 하상퇴적층은 평균 3 m 내외로 하천과 북쪽 연안구역으로 향할수록 두꺼운 층을 이루고 있다.

B구역은 과거 얕은 해안가를 매립하여 조성한 부지로서 총 14개소에 대하여 22공의 시추조사를 시행하였다(Fig. 12). B구역의 지층은 공장부지 조성 이전에는 조간대 지역으로 이를 매립한 매립토사층, 조간대 퇴적층, 풍화토사층 및 풍화암층으로 이어진다(Fig 13). 그러나 일부 인산, 황산공장부지 및 인광석창고부지와 염화칼륨창고 건물이 위치한 곳은 부지 조성전에 산지를 굴착하여 조성한 부지였다. 따라서 기반암의 심도

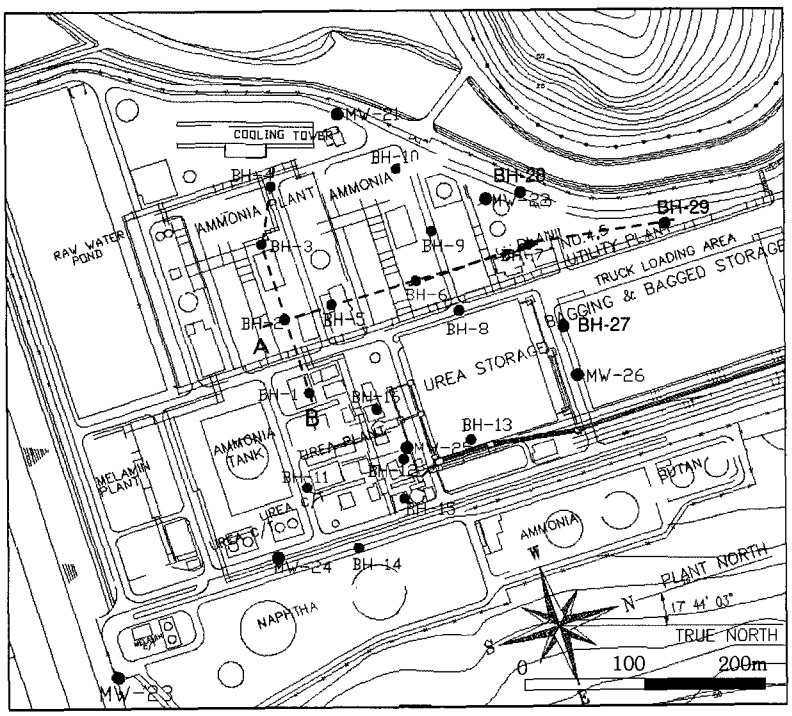


Fig. 10. Existing drilling locations for subsurface geological investigation and new installation of monitoring wells in the study site A.

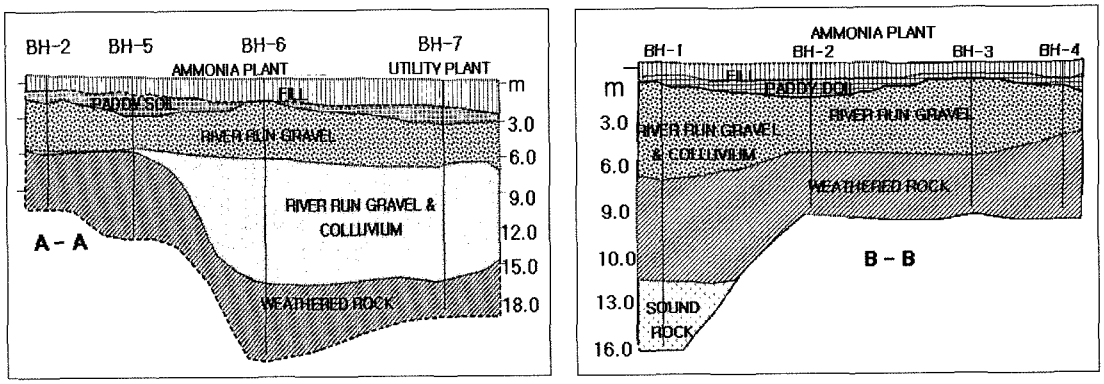


Fig. 11. Geological cross section A-A and B-B of the site A

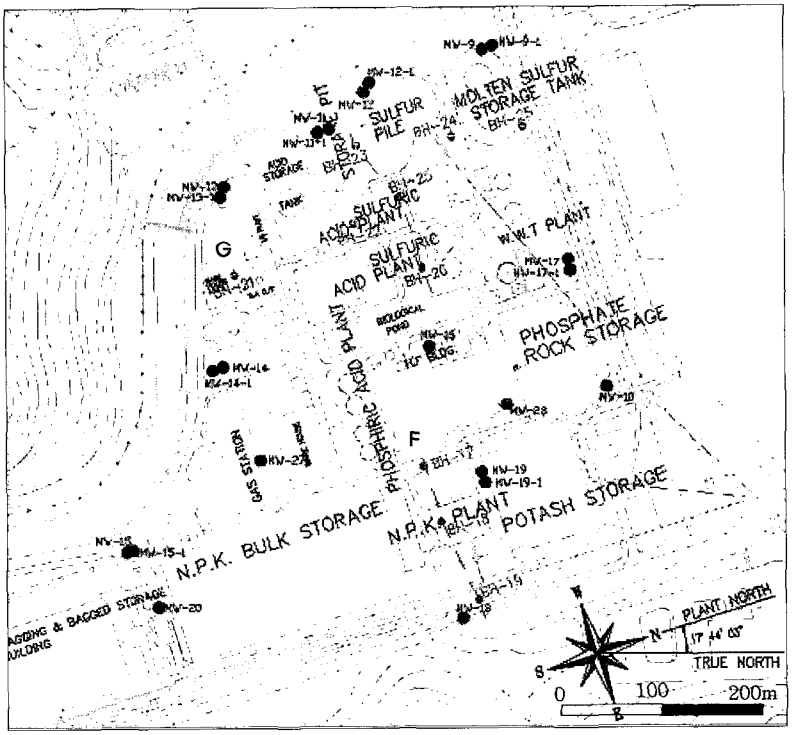


Fig. 12. Existing drilling locations for subsurface geological investigation and new installation of monitoring wells in the study site B.

가 매우 얕게 나타난다. 이러한 기반암은 공장부지 내에서 인산공장과 황산공장을 경계로 남쪽과 서쪽 부분으로 가파른 경사를 이루고 있어 기반암을 경계로 인근지역은 상대적으로 두꺼운 매립토사층과 조간대 퇴적층으로 구성되어 있다.

3.4. 지하수위 조사

해안가에 가장 인접되어 있는 MW9 관측정에 대한 모니터링 결과 지하수위는 약 12시간 간격으로 간조와 만조에 의한 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 하루 중 간조기와 만조기의 수위변동은 약 최소 3.8cm, 최대 4.6cm를 나타내는 것으로 관측되었으며 관측기간 중 최대 지하수위 변동은 12.9cm를 나타냈다. 지하수위는 조금(neap tide)에서 사리(spring tide)로 향할수록 소폭의 변동주기를 이루며 점차 수위가 상승하는 것으로 나타났다. 관측정 MW9에서 상류부에 설치된 MW12의 지하수위 모니터링 결과 역시 MW9과 같은 형태의 수위변동 양상을 보여준다(Fig. 14).

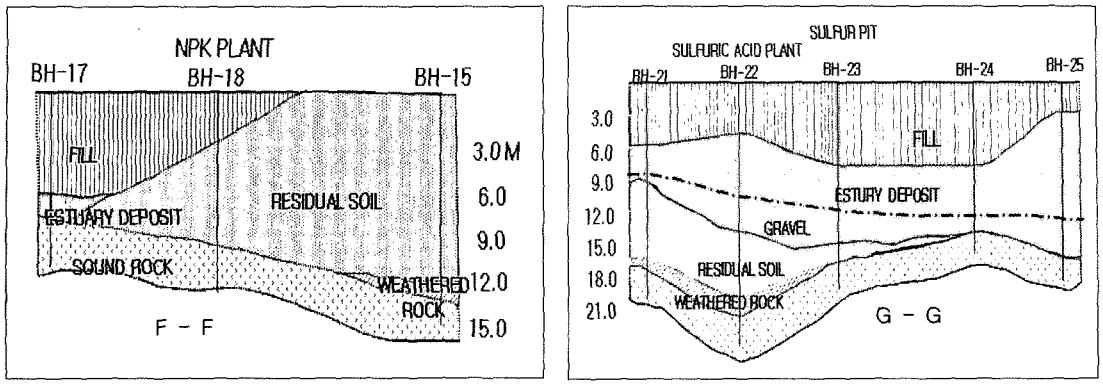


Fig. 13. Geological cross section of the line F and G of site B.

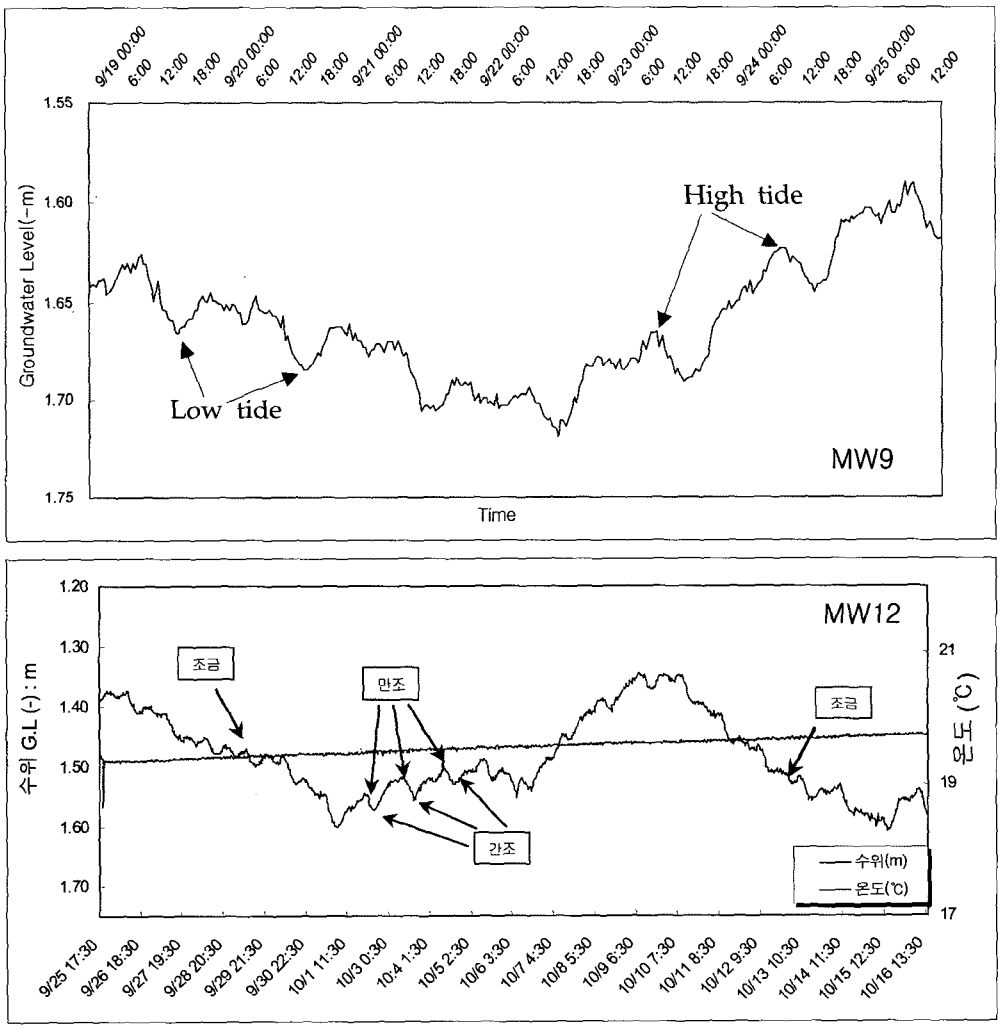


Fig. 14. Results of the groundwater monitoring of MW9 and MW12.

Fig. 15은 연구지역 내의 지하수위 등고선도와 유선 방향을 나타낸 것이다. 지하수위 등고선도에서 지하수의 유동은 크게 두 방향을 나타내고 있다. 즉, 지하수의 흐름이 부지 내에서 서쪽의 하천 방향으로의 흐르

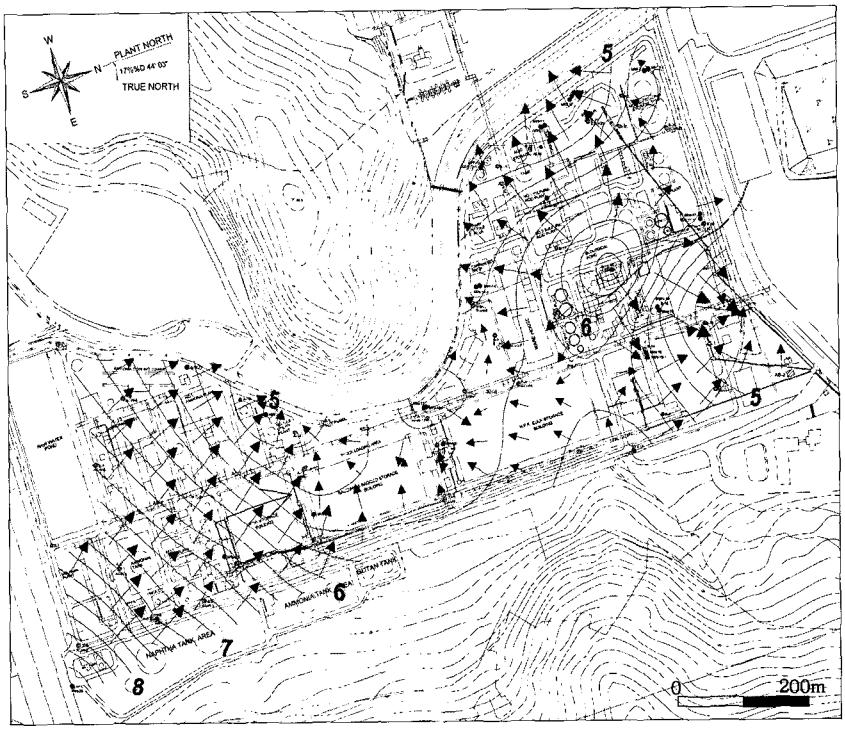


Fig. 15. Groundwater contour map and expected flow lines (above mean sea level, m).

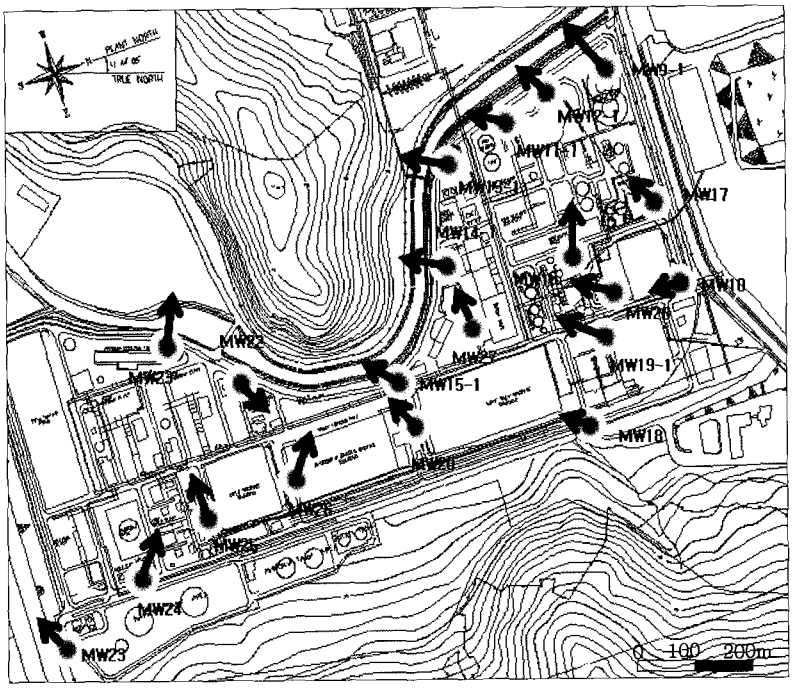


Fig. 16. Results of groundwater flow direction using flowmeter(GeoFlo® 200).

는 유형과 다른 하나는 정문방향을 향하는 흐름으로 구분된다. A구역에서는 전반적으로 동측의 사면에서 하천방향으로의 지형구배를 따른 지하수 흐름을 보이며 B구역에서는 공장 부근을 중심으로 동심원상의 지

하수 흐름을 나타낸다. 이와 같은 지하수의 흐름은 MW16지점에서 다량의 용수가 지하로 유입되어 나타나는 것으로 판단된다. 이러한 조사결과는 Fig. 16의 지하수유향유속 측정결과와 유사한 유향을 나타냈다.

3.5. 지하수 유향유속 측정

유향유속측정결과 A구역의 평균 유속은 0.27 m/day, 평균 유향은 201(자북(MN)기준), B 구역의 평균 유속은 0.28 m/day, 평균 유향은 229(MN기준)를 나타냈다. 따라서 A, B 구역 모두 주된 지하수의 흐름방향은 공장부지 서측의 하천방향으로 나타났으며 유속은 구역에 관계없이 유사한 결과를 보였으나 B구역의 유속이 다소 빠른 결과를 나타냈다(Fig. 16). 그러나 이러한 이유는 앞에서 설명하였듯이 B구역내에 지하로 공급되는 공급수에 의한 영향으로 판단된다.

3.6. 대수성 시험

Bouwer & Rice방법에 의해 산출된 수리전도도는 A구역이 평균 2.94×10^{-4}cm/s, Hvorslev 방법에 의해 산출된 값은 평균 3.30×10^{-4}cm/s로서 유사한 값을 나타낸다. B구역의 수리상수 산출결과는 Bouwer & Rice방법에 의한 평균값이 9.07×10^{-4}cm/s, Hvorslev 방법에 의해 산출된 값은 평균 1.03×10^{-3}cm/s를 나타냈다. A구역 및 B구역의 수리전도도를 비교해 보면, A구역이 평균 3.12×10^{-4}cm/s, B구역이 평균 9.65×10^{-4} cm/s으로서 A구역에 비해 B구역의 수리전도도가 더 높은 값을 보였다(Table 6).

3.7. 토양 시료 분석 결과

토양의 이화학적 특성은 지하수 유동, 오염물질의 흡착탈착, 분해, 분별(speciation), 침전용해, 산화환원,

Table 6. Results of the slug test analyses (Bouwer & Rice Method, 1976; Hvorslev Method, 1951)

Site	Well No.	Number of Tests	K (cm/s)			Screen Interval (depth, m)
			Method		Mean*	
			Bouwer & Rice	Hvorslev		
Site A	MW21	2	8.80E-05	9.80E-05	9.29E-05	6-9
	MW22	2	1.50E-04	1.70E-04	1.60E-04	2.5-6.5
	MW23	2	1.40E-04	1.70E-04	1.54E-04	4.5-10.5
	MW24	3	1.20E-03	1.30E-03	1.25E-03	7.5-10.5
	MW25	3	5.30E-04	6.10E-04	5.69E-04	1.5-4.5
	MW26	3	5.50E-04	5.80E-04	5.65E-04	1.5-4.5
	Mean*	-	2.94E-04	3.30E-04	3.12E-04	
Site B	MW9	3	1.60E-04	2.60E-04	2.04E-04	6-9
	MW9-1	3	6.60E-04	7.00E-04	6.80E-04	3-6
	MW10	4	3.00E-03	2.70E-03	2.85E-03	4.5-6
	MW11	3	1.00E-03	1.10E-03	1.05E-03	6-9
	MW11-1	3	7.30E-03	8.40E-03	7.83E-03	3-6
	MW12	2	2.80E-05	3.20E-05	2.99E-05	4-7
	MW12-1	4	2.40E-03	3.40E-03	2.86E-03	1.5-3
	MW13	3	1.10E-04	1.80E-04	1.41E-04	7.5-10.5
	MW13-1	3	5.90E-04	5.70E-04	5.80E-04	3-4.5
	MW14	3	7.30E-04	7.90E-04	7.59E-04	4.5-7.5
	MW14-1	3	2.20E-04	2.80E-04	2.48E-04	1.5-3
	MW15	3	1.20E-03	1.20E-03	1.20E-03	3-4.5
	MW15-1	2	4.30E-04	4.60E-04	4.45E-04	0.5-2
	MW16	4	2.20E-02	2.10E-02	2.15E-02	3-6
	MW17	3	1.20E-03	1.20E-03	1.20E-03	3-4.5
	MW17-1	3	2.50E-04	3.20E-04	2.83E-04	0-1.5
	MW18	3	1.20E-03	1.50E-03	1.34E-03	3-6
	MW19	3	6.00E-04	6.90E-04	6.43E-04	4.5-9.5
	MW19-1	3	4.90E-04	5.40E-04	5.14E-04	1.5-3
	MW20	3	3.70E-04	3.30E-04	3.49E-04	2.5-5.5
	MW27	3	4.80E-03	5.00E-03	4.90E-03	1.5-4.5
	MW28	4	3.40E-02	3.80E-02	3.59E-02	1.5-3
	Mean*	-	9.07E-04	1.03E-03	9.65E-04	

*geometric mean

유동 등 토양 및 대수층에서 오염물질의 거동에 밀접한 영향을 미친다. 또한 토양과 지하수오염물질의 정화 및 관리대책 수립에 필요한 기초자료를 제공하게 된다.

3.7.1. 입도 분석 결과

공장부지에서 채취한 토양에 대한 입도분석 결과, 모래(sand), 실트(silt), 점토(clay) 함량의 백분율에 의해 분류하는 미국 농무성(USDA, 1993)의 토양삼각분류표에 따르면, 매립토양의 입도는 미사질양토(silt loam), 매립된 구하상 퇴적층은 자갈을 많이 포함한 사양토(sandy loam), 매립토 하부에 분포하고 있는 과거 조간대의 퇴적층은 해안에서 육지방향으로 향하면서 다양한 입도분포 특성을 나타낸다. 연안지역에 해당하는 조간대의 퇴적층은 점토(clay), 미사질양토, 자갈이 많은 사질양토 등으로 구성되어 있으며, 점토층과 자갈이 많이 포함된 사양토는 미사질양토층에 수차례 반복되면서 협재되어 있다.

3.7.2. 유기물 함량

공장부지의 A구역 3개 지점(A-3, A-15, A-17), B구역 1개 지점(B-22)에서 심도별로 3~10점의 시료를 채취하여 토양 중 유기물 함량을 분석하였으며, 4지점의 배경시료를 채취하여 비교하였다. 유기물함량은 A-17점이 평균 4.8 wt%로서 가장 높았으며, 나머지 시료에서는 0.7~1.5 wt%로서 비교적 적은 유기물 함량을 나타냈다. 배경시료는 9.6 wt%로서 공장부지에 비해 상대적으로 높은 유기물 함량을 나타냈다. 이는 공장부지의 경우 유기물함량이 낮은 토사를 매립하여 조성한 부지이기 때문일 것으로 판단된다.

3.7.3. 양이온 교환능(CEC, Cation Exchange Capacity)

토양의 CEC가 크면 토양의 양이온에 대한 흡착성이 커지므로 토양 내에서 양이온의 이동성이 낮아진다. 연구부지 토양의 CEC는 3.85~17.8 cmol/kg을 나타내어 배경 토양시료의 CEC 범위인 7.6~17.3 cmol/kg와 유사한 범위를 나타냈다.

3.7.4. 수소이온농도(pH)

연구지역 주변의 배경 토양의 수소이온농도 범위는 pH 3.39~5.51로 산성을 나타낸다. 그러나 부지 내의 토양은 pH 3.02~12.42의 강산성에서 알칼리성으로 다양하게 나타난다. 이러한 다양한 pH 값의 분포는 화학공장 부지 내의 제품생산 및 원료물질의 누출과 밀접한 관련성이 있는 것으로 판단된다. A구역 토양의 pH는 4.0~12.4, 평균 6.9로서 산성에서 강알칼리성의 범위를 이루고 있으며, B구역은 pH 3.0~7.8, 평균 6.4를 나타내어, A구역이 B구역에 비해 보다 넓은 범위의 수소이온농도를 보이고 있다.

3.7.5. 불소(F)

불소는 연구지역 공장에서 생산하는 제품의 원료인 인광석과 제품생산 부산물에 고농도로 함유되어 있으며, 불소침착증(fluorosis)이라는 질병을 유발하는 환경유

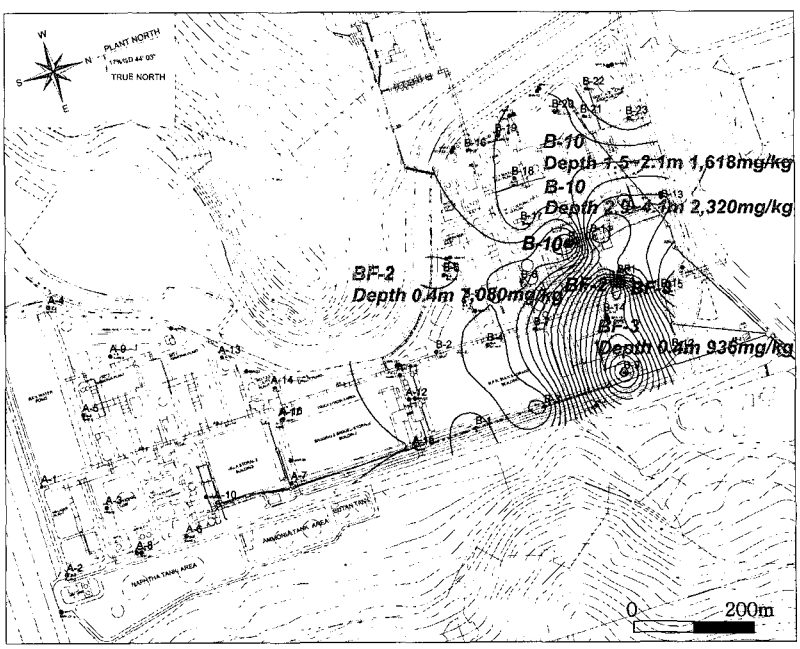


Fig. 17. Aerial distribution of fluorine in soil.

해물질이다. 이러한 불소는 원료, 제품, 폐수, 부산물 등의 취급과정에서 부지 내의 토양에 유입되어 토양 및 지하수의 오염을 유발할 수 있다. A구역의 불소이온 농도는 24.4 mg/kg~105 mg/kg으로 평균 44 mg/kg을 나타냈으며, 대부분 100 mg/kg 이하의 낮은 농도를 나타냈다. B구역은 21.8 mg/kg~7,080 mg/kg으로 평균 228.35 mg/kg을 나타냈다. 불소에 의한 토양오염은 Fig. 17과 같이 주로 "B"구역에 확산되어 있으며, 이는 불소원료 저장탱크가 위치한 지역으로, 원료물질을 탱크에 주입불출하는 과정에서의 넘침(overflow)에 의해 토양으로 직접 유입되는 것과 공정 중에 발생하는 불소를 함유한 폐수의 지하유입에 기인하는 것으로 판단된다.

3.7.6. 중금속(Cd, Cu, As, Hg, Pb, Cr^{6+}, Zn, Ni)

연구지역은 공업단지에 위치한 공장지대로서 토양환경보전법의 토양오염 기준 "나" 지역에 비교하였다. 오염기준 중 중금속으로 "나" 지역 대책기준을 초과한 곳은 없었다. A구역에서는 우려기준을 초과하는 곳이 없었으며, B구역도 일부 지점에서 Zn를 제외하고 전 지역이 중금속의 토양오염 "나" 지역 우려기준 및 대책기준을 초과하지 않은 것으로 나타났다.

토양환경보전법의 토양오염 "가" 지역 기준과 비교해 볼 때에도 B-22지점에서 Zn가 우려기준(Zn: 800 mg/kg) 또는 대책기준(Zn: 2,000 mg/kg)을 초과하는 것으로 나타났다. 이는 부지이력 조사에서, 이 지역이 과거 금속성 폐자재를 야적하였던 곳으로 오랜 동안 주변지역 유황야적장등에서 기인한 산성(acid) 물질에 의해 Zn 성분이 부식 또는 용출되어 나타난 결과로 판단된다.

3.7.7. 특정 유기오염물질(CN^-, PCB, TCE, PCE, 페놀)

공장부지에서의 특정 유기오염물질은 모든 시료에서 검출되지 않았으며 일부 시료에서 CN-의 농도가 "나"지역 토양오염 우려기준(120 mg/kg)에 비해 크게 못 미치는 0.03~0.4 mg/kg정도의 낮은 농도를 나타내었다.

3.7.8. 유류(BTEX, TPH)

토양오염물질 중 유류 성분은 조사지역 내에 설치되어 있는 특정토양오염유발시설 중 석유류의 제조 및 저장시설을 대상으로 하였다. 유류항목에 대한 분석결과 BTEX는 공장부지 B구역 내 주유소 부근에서 매우 소량(0.002~0.1 mg/kg) 검출되었으며, TPH는 A구역 벙커C유 탱크 주변에서 72~493 mg/kg가 검출되어 토양환경보전법 "나" 지역 우려기준(BTEX 80 mg/kg, TPH 2000 mg/kg) 이내에 포함되었다. 이러한 유류성분의 검출은 지하유류저장탱크에서 일부 누유되거나 유류의 주입 또는 불출과정에서 낙유된 유류성분이 잔류되어 나타난 것으로 판단된다.

3.8. 지하수 시료 분석 결과

3.8.1. 수소이온농도 (pH)

조사부지의 지하수는 강산성에서 강알칼리성으로(pH

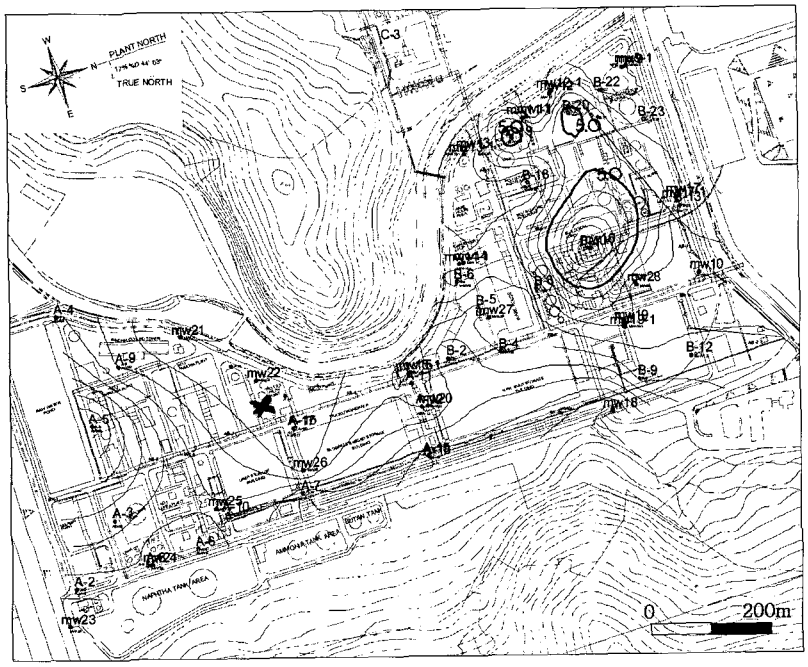


Fig. 18. Aerial distribution of pH in groundwater.

1.73~10.77) 다양한 pH분포를 나타내고 있다(Fig. 18). A지역의 지하수는 전반적으로 천층 지하수가 배경시료에 비해 pH가 높았으나 심부의 지하수는 배경시료와 유사한 중성 및 약산성을 나타냈다. 이러한 원인은 알칼리성 오염물질이 표토로부터 유입되어 지하수로 확산되었을 가능성을 지시한다. B구역은 많은 양의 산(酸)을 생산하고 사용하는 지역으로, 지하수의 pH는 강산성에서 약알카리성으로 측정되었다(Fig. 19).

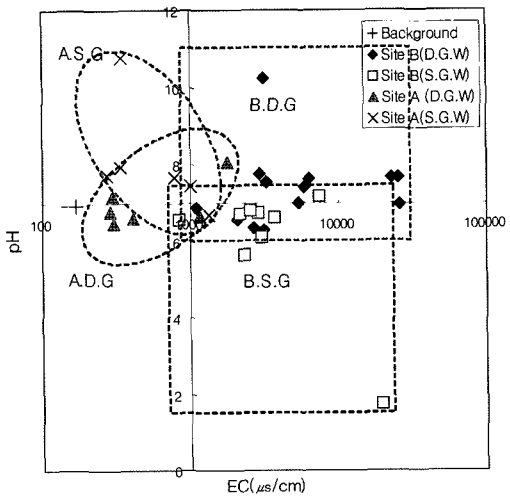


Fig. 19. Scatter diagram of pH and EC of study area. A: Site A, B: Site B, S.G: Shallow groundwater(Depth below 4 m), D.G: Deep groundwater(Depth above 4 m).

3.8.2. 전기전도도(electrical conductivity; EC)

A, B구역 내 지하수의 전기전도도는 모두 배경지하수의 전기전도도(219~385 μS/cm)에 비해 상대적으로 높은 전기전도도를 보이고 있다. 전반적으로 A구역의 지하수보다 B구역의 지하수에서 EC값이 상당히 높게 관측되며, EC값이 10,000 μS/cm 이상 높게 나타나는 지하수가 B구역의 6지점(B-2, B-10-1, MW11, MW13, MW16, MW27)에서 관측되었다 (Fig. 20).

A구역 공장부지내에서는 전반적으로 지하수 관측정에서 채취된 지하수(심부지하수) 시료가 토양 시료채취공에서 채취된 지하수(천부지하수)에 비해 낮은 EC값을 가진다. 이는 pH에서 보이는 변화와 동일하며, 따라서 오염물질이 지표에서 유입되어 심부로 이동하였음을 지시한다.

B구역에서 EC값이 10,000 μS/cm이상을 나타내는 지하수는 공장에서 사용하는 산(酸) 공장과 폐수처리장 인근지역에서 높게 나타나며, 심도를 달리하는 병립 관측정을 설치하여 동일지점에서 천부 및 심부지하수를 채취한 결과(MW11, MW13, MW16, MW27),

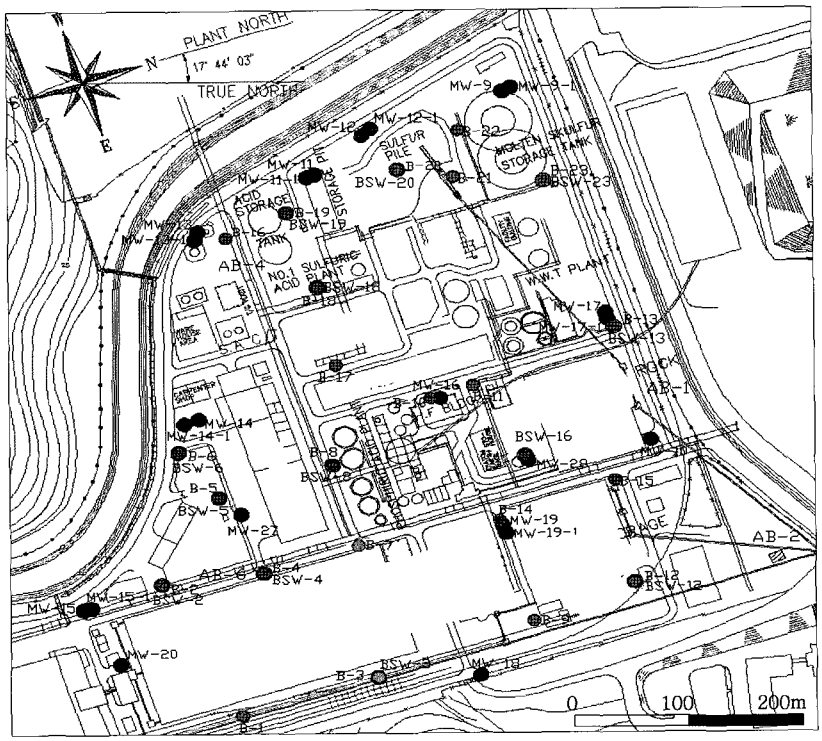


Fig. 20. Soil and groundwater sampling locations of site B.

Table 7. Matrix of heavy metal contaminants for groundwater monitoring wells.

Site	Well No.	Cd	Pb	Cr^{6+}	Zn	Ni	Al	Fe	Mn
A	mw21		◎○●				◎ ●	◎ ●	
	mw22		◎○●					◎ ●	◎ ●
	mw23		◎○●						
	mw24		◎○●						
	mw25	◎○●	◎○●						◎
	mw26		◎○●			●			◎ ●
B	mw9	◎○●	◎○●			○●			◎ ●
	mw9-1		◎○●						◎ ●
	mw10		◎○●						◎ ●
	mw11	◎○●	◎○●			●			◎ ●
	mw11-1		◎○●					◎ ●	◎ ●
	mw12		◎○●						◎ ●
	mw12-1		◎○●					◎ ●	◎ ●
	mw13	◎○●	◎○●			○●			◎ ●
	mw13-1	◎○●	◎○●			●			◎ ●
	mw14	◎○●	◎○●						◎ ●
	mw14-1	◎○●	◎○●						◎ ●
	mw15		◎○●						◎ ●
	mw15-1		◎○●						◎ ●
	mw16	◎○●	◎○●		◎ ●	○●	◎ ●	◎ ●	◎ ●
	mw17	◎○●	◎○●			●			◎ ●
	mw17-1		◎○●			●			◎ ●
	mw18	◎○●	◎○●				◎ ●		
	mw19	◎○●	◎○●			●			◎ ●
	mw19-1	◎○●	◎○●						◎ ●
	mw20	◎○●	◎○●			●			◎ ●
	mw27	◎○●	◎○●			○●		◎ ●	◎ ●
	mw28	◎○●	◎○●			●			
Background	BG1					○●			
	BG2					○●			
Korea Drinking Water Standards	◎	0.010	0.050	**0.05**	**1.00**	-	**0.20**	**0.30**	**0.30**
EPA Drinking Water Standards	○	0.005	0.015	0.10	-	0.10	2.00	-	-
WHO Drinking Water Standards	●	**0.003**	**0.010**	**0.05**	3.00	**0.02**	0.20	0.30	0.50

◎ Excess of Korean Drinking Standards, ○ Excess of EPA Drinking Standards
● Excess of WHO Drinking Standards

심부지하수의 EC값이 높게 나타났다. 이러한 현상은, 이 구역이 해안을 매립하여 조성된 부지로서, 매립층 하부에는 과거 해양환경의 잔류염분이 남아있거나 해수의 조석에 의한 영향에 따른 것으로 판단된다.

3.8.3. 중금속 항목(Cd, Pb, Cr^{6+}, Zn, Ni, Al, Fe, Mn)

관측정에서 채취한 지하수의 수질분석 결과를 국내의 먹는물 수질기준, 미국 EPA 먹는물 기준 및 WHO의 먹는물 기준과 비교하였다. 이 중 Cr^{6+}를 제외한 모든 항목에서 하나 이상의 수질기준을 초과하였으며 특히, Cd과 Pb는 각각 국내의 먹는물 수질기준(Cd: 0.01 mg/L, Pb: 0.05 mg/L)을 모두 초과하여 오염되어 있는 것으로 나타났다(Table 7). A구역의 지하수는 MW25에서 Cd이, 그리고 6개의 관측정 모두에서 Pb의 국내 먹는물 수질기준을 초과(Fig. 21)하였으며, 일부 관측정에서 Ni, Al, Fe 및 Mn항목이 수질기준을 초과하였다(Table 7).

B구역에서는 22개의 모든 관측정에서 납(Pb)이 먹는물 수질기준 0.05 mg/L를 초과하였으며 Mn은 2개소를 제외한 20개 관측정 모두에서 기준을 초과하는 것으로 나타났다. 카드뮴(Cd)은 14개의 관측정에서 국내의 먹는물 수질기준을 초과하였다. 특히 인산을 취급하는 공장주변의 관측정에서는 Cr^{6+}를 제외한 Cd,

Pb, Zn, Ni, Al, Fe 및 Mn 항목이 기준을 초과하는 것으로 나타났다. 이밖에 A, B 구역의 모든 관측정에서 Cr^{6+}, As 및 Hg은 검출되지 않았다.

A, B구역에서 이러한 다양한 중금속에 의한 지하수 오염현상은, B구역 공장에서 취급되는 산(황산, 인산, 불산)과 인광석을 원료로 한 인산의 제조과정에서 발생한 산성폐수가 지하로 유입되면서 석고폐수에 함유된 중금속의 지하수 유입 또는 산성수에 의한 공장 철구조물 등으로부터 중금속이 용출, 확산되어 지하수 오염원으로 작용하고 있는 것으로 해석된다.

3.8.4. 질산염(NO_3^-)

A구역의 최상류부에 위치하는 관측정의 지하수 시

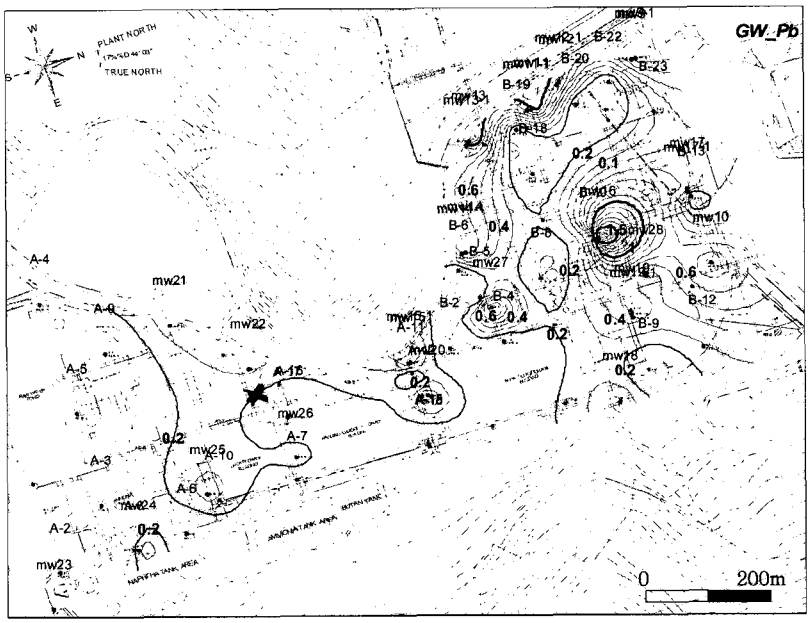


Fig. 21. Aerial distribution of Pb in groundwater(mg/*l*).

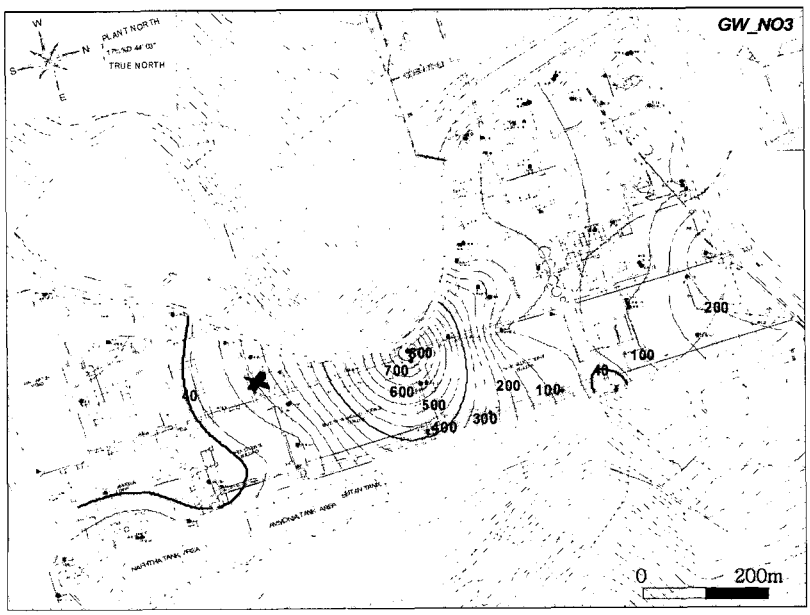


Fig. 22. Aerial distribution of NO_3^- in groundwater(mg/*l*).

료에서 공업용수기준(<40 mg/l)을 초과한 NO_3^-가 검출되었다. 이 관측정은 공장부지 남동측 가장자리에 위치하고 있으며, 지형 및 지하수 수리구배로 볼 때 공장부지에서의 오염물질에 의한 영향을 거의 받지 않을 것으로 판단된다. 그러나 부지내의 다른 곳에서 보다 질산염의 농도가 높게 나타나고 있다(Fig. 22). 주변지역에는 공업용 저수지와 농경지, 주거지 등이 분포하고 있어, 이 지점에서 관측되는 높은 NO_3^- 농도는 과거 농경지 및 고지대에 위치하였던 주거지나 축사 등에서 기원한 것으로 판단된다.

B구역에서 나타나는 고농도의 질산염은 A구역의 제품포장공장과 B구역 복합비료 저장창고 사이의 요소($CO(NH_2)$)와 복합비료 등 주로 질소화합물을 취급하는 공장을 중심으로 확산되는 경향을 보였다. 이러한 원인은 제품의 포장전, 원료의 취급과정에서 유출된 후 강우 등에 의해 용해되어 지하수 유입되어 주변지역으로 확산된 것으로 판단된다.

3.8.5. 불소(F)

B구역의 지하수가 A구역에 비해 상대적으로 높은 농도의 불소를 함유하고 있다. A구역의 1개 지점(MW25 : 2.26 mg/l)에서는 국내 먹는물 수질기준(1.5 mg/l)을 약간 상회하였으나, B구역의 산(acid) 공장 근처에 설치된 MW16 관측정의 지하수에서는 매우 고농도(1,738.42 mg/l)의 불소가 검출되었다. B구역의 지하수가 상대적으로 높은 농도의 불소를 함유하는 것은, 이 구역의 토양에 고농도로 부화된 불소가 강수와 유출수의 지하 침투로 인해 지하수로 확산되고 있는 것으로 해석된다.

3.8.6. 유기오염물질

연구대상 공장부지의 지하수에서 특정유해 오염물질 중 중금속을 제외한 기타 오염물질 유기인 화합물, 페놀, TCE, PCE, 1.1.1 트리클로로에탄, Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene 및 TPH는 모두 검출되지 않았다.

3.9. 지표수 시료 분석 결과

공장부지 주변의 R-하천은 해수의 조석에 의한 직접 영향권에 위치함으로 상류로부터 하류로 향하면서 용출수를 제외한 하천수의 전기전도도(EC)와 염소농도가 증가하는 경향을 보인다. 하천 상류부에 대한 지표수 조사결과, 이곳의 농경지와 취락지에 의해 유입되는 폐수 및 농경지 배수로 인한 뚜렷한 하천 오염현상은 나타나지 않았다. 또한 공장부지 남단의 인접 Q 공장지역에서 합류되는 배출수와 지정폐기물 매립장의 침출수에 의한 하천오염 징후도 관찰되지 않았다. 이후 최상류인 공장부지 서측 A구역을 통과하는 부분의 하천수 또한 육안으로 관찰되는 오염징후나 부지 내에서 하천으로의 침출수 유출현상은 발견되지 않았다. 그러나 하천의 최하류부인 공장부지 B구역에 인접한 하천가의 제방 둑 S4, S6, S11지점에서는 공장부지에서 외부로의 용출수가 인지된다.

하천수의 생활환경보전기준(환경정책기본법 시행령

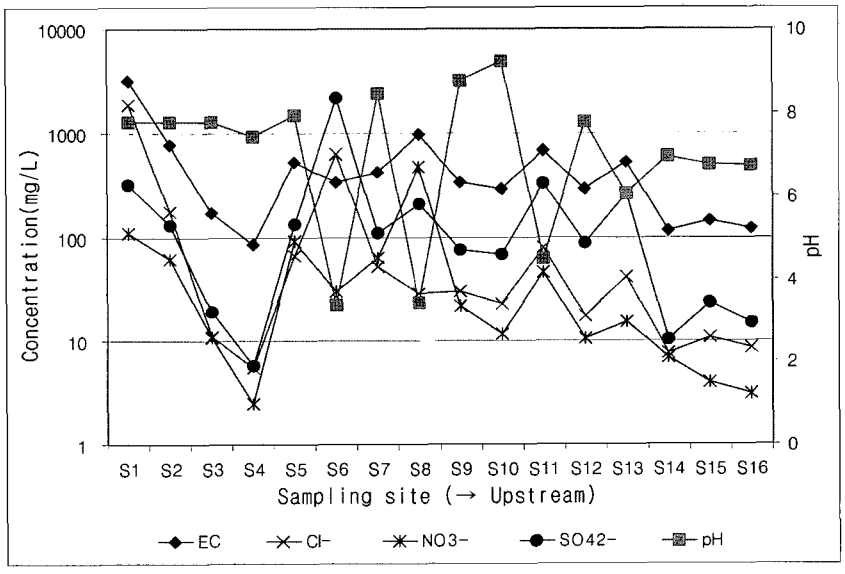


Fig. 23. Variations of pH and major anion concentration in stream water sample(S1~S14: Stram water sample).

환경기준)에 비교해 볼 때 pH는 S6(3.37), S8(3.43), S9(8.74), S10(9.20) 및 S11(4.48)의 5개 지점에서 수질기준(pH 6.0~8.5)을 초과하는 산성 또는 알칼리성을 나타냈다. 그 밖에 하천수 사람의 건강보호 기준(환경정책기본법 시행령 환경기준)의 8개 항목(Cd, As, CN, Hg, 유기인, Pb, Cr^{6+}, PCB)에서는 Cd항목만이 S1(0.02 mg/L)과 S6(0.01 mg/L) 두 지점에서 하천수 수질기준(<0.005 mg/L)을 초과하였다.

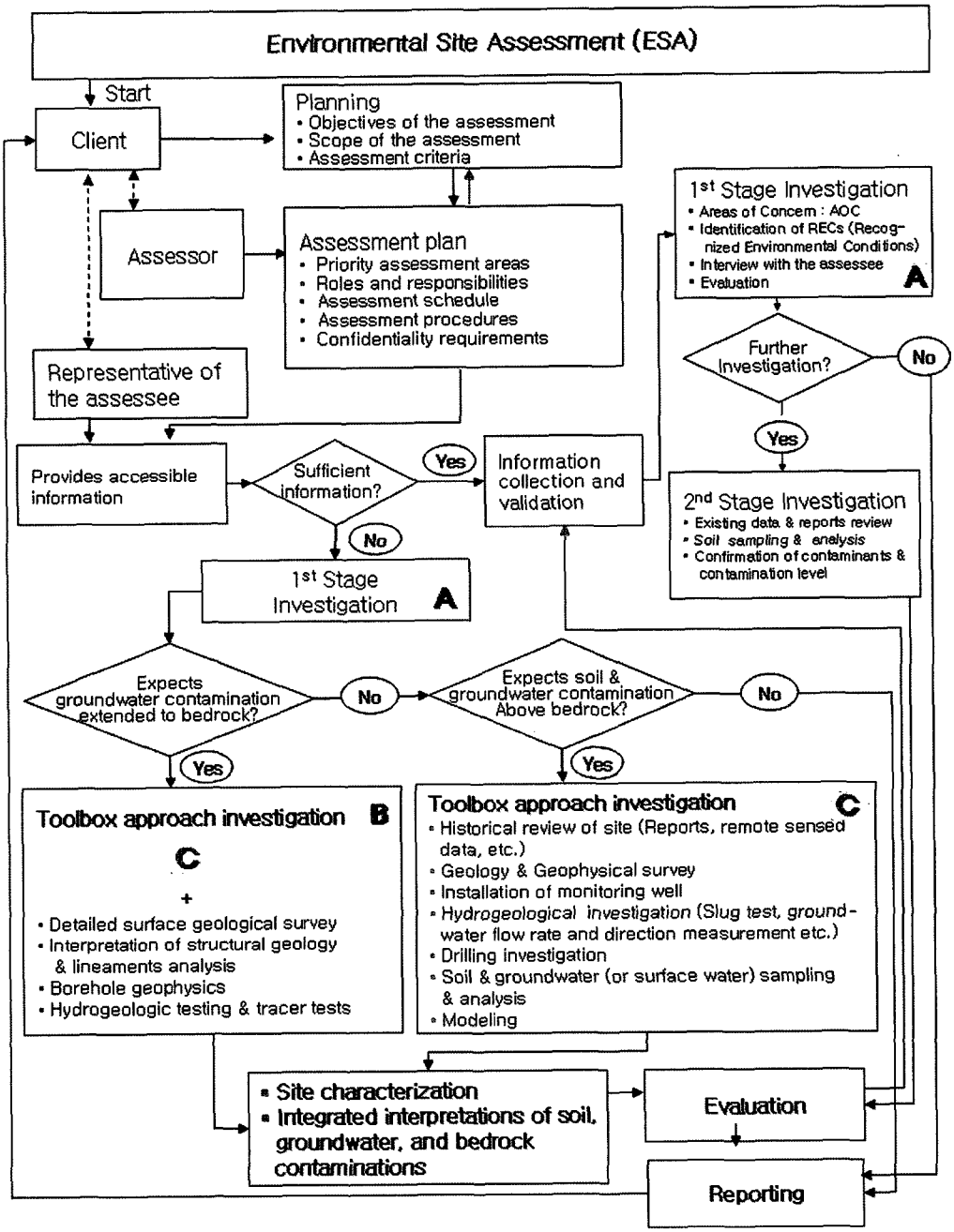


Fig. 24. Proposed 'Environmental Site Assessment (ESA)' using a toolbox approach: Dotted line box is present procedure according to the 'Guideline for Soil Environment Assessment'(MOE, 2001).

Fig. 23에서 pH는 연구지역 상류부에서 pH6~7의 중성범위에서 하류부로 향하면서 강산성 또는 약알칼리성~강알칼리성을 나타냄으로써 하류부에 위치한 공장에서 유입되는 침출수에 의한 영향을 받고 있음을 나타냈다. 또한 pH가 낮은 지점에서 염소, 질산염 및 황산염 등의 농도가 높게 나타나고 있어 주로 산과 알칼리를 취급하는 공장주변에서 용출되는 침출수와 함께 이러한 성분들이 인근 수계에 대한 수질오염원으로 작용하고 있음을 알 수 있다.

4. 결론 및 제언

이번 연구에는 현재 국내에서 부지의 환경성평가를 위해 적용 가능한 다양한 조사기법을 활용하여 이미 오염된 부지의 오염현황을 최대한 정량적으로 정밀하게 평가하고, 실제 부지환경평가 과정을 통하여 비용경제적이면서도 과학적인 부지환경평가를 위한 복합조사기술을 도출하고자 하였다.

이 연구는 기초조사, 부지현황조사, 시료채취 및 분석, 관측정 설치 및 수리지질 조사, 자료분석의 6단계로 진행되었으며, 최종 분석결과는 부지에서 지하수와 오염물질의 거동 및 추후 개발될 복원기술의 적용성과 효율성을 평가, 모사하기 위한 모델링 작업의 기초자료와 입력정보로 사용되었다.

각 단계에서 수행된 내용과 결과는 부지환경성 평가에 다음과 같이 적용되었다:

(1) 기초조사
(2) 부지현황조사
(3) 시료채취 및 분석
(4) 관측정 설치 및 수리지질 조사
(5) 자료분석

이 연구에서는 부지환경평가를 함에 있어 국내의 "토양환경평가" 지침을 기초로 하였으나 이는 부지에 수반되는 토양과 지하수의 두 가지 매체를 상호 연계하여 평가하여야 함에도 불구하고 토양의 오염도 평가에 집중되는 결과를 초래하고 있다. 따라서 본 연구에서는 미국 ASTM에서 규정하고 부동산 거래시 이용되는 부지환경평가 방법을 바탕으로 이를 보완하여 공장부지의 오염도를 평가하였다.

국내의 경우, 부지환경평가를 시행함에 있어서는 가장 중요한 첫 단계의 기초조사 자료를 확보하는 과정에서부터 자료의 부족과 많은 제약이 따른다. 즉, 과거 부지의 환경이력을 파악할 수 있는 자료의 보관 형태, 체계적인 공개 자료의 미비, 열람의 제한, 공개자료 구축의 미약으로 인한 상호확인(cross check)이 어려우며 자료의 신빙성 감소, 관계자 인터뷰에 거부감 등으로 인해 ASTM 규격을 모두 국내에 적용하기에는 한계점이 있다. 그러므로 이 연구에서는 국내에서 부지환경평가를 위한 이러한 기초자료의 불확실성과 자료획득의 제약을 보완하기 위하여 몇 가지 이용가능하고 경제적이며 복합적인 조사기법을 적용(toolbox approach)하였다. 이러한 복합적 조사기법을 적용함으로써 부지환경평가(환경부 고지 제2001-202호에 따른 "토양환경평가")를 시행하는데 있어 보다 용이하고 효율적인 평가가 이루어질 수 있을 것으로 기대한다. 이 연구는 연안지역에 위치한 대규모 화학공장 부지를 대상으로 평가였으나, 향후 대상 부지의 규모, 지형적 특성 및 가용할 수 있는 기존자료의 확보 정도에 따라 조사기법들을 다양하게 조합하여 사용이 가능할 것으로 판단된다.

이 연구조사의 결과, 토양과 지하수로 오염된 연안지역의 대규모 공장부지에 대한 부지환경평가(Environmental Site Assessment)에는 Fig. 24와 같은 절차와 조사기술들을 복합적으로 사용하는 것이 가장 적절할 것(best practice)으로 제안 한다. Fig. 24에서 ASTM에서 제시하는 부지환경평가와의 주요 차이점은 국내 토양환경평가에서 제시하고 있는 1단계 조사결과를 바탕으로 기반암 상부 및 기반암의 오염가능성 여부에 따라 부지특성화를 위한 각각의 조사기법들을 복합적으로 적용하는데 있으며, 이러한 방법은 토양과 지하수오염을 연계하여 평가하는데 효과적으로 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

사 사

이 연구는 박사학위 청구논문의 일부로서 수행되었으며, 이 논문의 심사과정에서 세심하게 검토하여 유익한 조언과 의견을 주신 익명의 심사위원님께 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

American Society for Testing and Materials(ASTM) (2000) Standards on envrironmental site assessments for commercial real estate. ASTM E-1527-00, E1528-00.

American Society for Testing and Materials(ASTM)

(1997) Standard Practice for Environmental Site Assessment : Phase I Environmental Site Assessment Process. ASTM Designation : E 1527-97.

American Society for Testing and Materials(ASTM) (1997) Standard Guide for Environmental Site Assessments : Phase II Environmental Site Assessment Process. ASTM Designation: E 1903-97.

Chang, H.S., Lim, H.R. and Hong, J.H. (1998) Application of electromagnetic and electrical survey for soil contamination in land-fill area. Geophysical Exploration, v.1, p.87-91.

Cynthia, R.E. and David, A.D. (1997) Remediation of metals-contaminated soils and groundwater. Technology Evaluation Report, GWARTC, TE-97-01.

Day, S.J., Morse, G.K. and Lester, J.N. (1997) The cost effectiveness of contaminated land remediation strategies. The Science of the Total Environment, v.201, p.125-136.

Gillham, R.W. 1988. Glossary of groundwater monitoring terms. Water Well Journal, v.42, p.67-71.

Hinze, W., Roberts, R.L. and Leap, D.I. (1990) Combined analysis of gravity and magnetic anomaly data in landfill investigation. Geotechnical and environmental geophusics, Socl. Expl. Geophys., v.2., p.267-271.

Hwang, J.S., Choi, S.I. and Han, S.G. (2005) Sequential washing techniques for arsenic-contaminated soils near the abandoned iron-mine. Jour. of KoSSGE, v.10, p.58-64.

Kim, Y.W. (2001) Environmental remedial investigation and plan for the soil and groundwater contaminated with petroleum. The 3rd special symposium of the Korean Society of Exploration, p.35-57.

Kim, K.W. and Shon, H.W. (1994) Heavy metal contamination in soils and groundwater in the vicinity of the Sindae-dong waste disposal site, Taejon. Jour of the Kor. Soc. of Groundwater Environment, v.1, p.85-89.

Lee, J.S. (2006) A heading for soil conservation policy and understanding of the soil environment conservation law. National Institute of Environmental Human Resources Development. 30p.

Mercer, J.W. and Spalding, C.P. (1991) Geologic aspects of site remediation. Seminar Publication; Site characterization for subsurface remediation, EPA/625/4-91/026.

Ministry of Environment(MOE) (2007) Results of polluted soil investigation in the national industrial complex. http://web2.me.go.kr, Press release on May 25th, 2007.

Ministry of Environment(MOE) (2006) The master plan of soil conservation. 43p.

Nathanail C.P. and Earl, N. (2001) Human health risk assessment: guideline values and magic numbers. In: Hester RE, Harrison RM (eds) Assessment and reclamation of contaminated land. Royal Society of Chemistry, Cambridge, p.85-102.

Park, E.R. (2003) The workshop for counterplan of soil environment conservation and a case study of remediation for contaminated soil and groundwater and a plan for assessment after finished remediation. Korean Society of Soil and Groundwater Environment, p.5-9.

Satoru Ohya (2001) Application of geophysical exploration for environmental earth sciences and engineering. The 3rd special symposium of the Korean Society of Exploration, p.1-13.

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. Geophysical Exploration, v.8, p.137-144.

Stewart, M., Layton M. and Lizanec T. (1983) Application of subsurface resistivity surveys to regional hydrogeologic reconnaissance. Groundwater, v.21, p.42-48.

Urish, D.W. (1983) The practical application of surface electrical resistivity to detection of ground-water pollution. Groundwater, v.21, p.144-152.

U.S. Department of Agriculture(USDA) (1993) Soil survey manual. Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture Handbook, Soil Survey Division Staff, No.18. 3rd ed., 457p.

U.S. EPA (2006) Case study: The role of a conceptual site model for expedited site characterization using the triad approach at the Poudre River Site, Fort Collins, Colorado. EPA 542-R-06-007.

U.S. EPA (2000) Solidification/stabilization use at superfund sites. EPA/542/R-00/010.

U.S. EPA (1994) Guidance for the data quality objectives process. EPA QA/G-4, EPA 600/R-96/055.

2007년 6월 29일 원고접수, 2007년 8월 25일 게재승인.