인천지역 토양오염 조사 및 해석을 통한 장래 예측 연구

A Study on the Numerical Analysis for Soil Contamination Prediction in Incheon Area

신 은 철¹ Shin, Eun-Chul
이 명 신² Lee, Myung-Shin
박 정 준^{3*} Park, Jeong-Jun

ABSTRACT

This paper analyzes the map of soil contamination in years of 2009 by actual survey in Incheon. South-east national industrial complex and the US Army base in Bu-Pyung are turned out to be high polluted area because spilling of oil storage facilities, vehicle and glass industries. So, the soil contamination in Incheon Metropolitan area will be getting more attention. To solve this problem, the soil contamination has been predicted by using the visual Sufer and visual Modflow which are analysis program in geotechnique and water flow. The result of analysis is that F and TPH will be retarded after 5 years. However, the contamination diffusion will be increased if there is no proper management of soil contamination.

요 지

본 논문에서는 2009년도 인천지역 토양오염 실태조사에 따른 오염 분포도를 분석하였다. 인천 남동국가 산업단지, 부평 이전 미군기지, 서구 매립지 등에서는 유류저장 시설, 자동차 및 유리 산업화, 군부대 시설에 따른 유류 및 중금속 유출 등의 산업 및 경제 활동으로 토양오염 분포도가 다소 높게 조사되었다. 특히 인천의 토양오염 우려 지역을 대상으로 수치해석을 통한 장래 오염 평가를 하였다. 향후 5년 후 불소와 석유계총탄화수소의 오염은 점차 정화 될 것으로 판단되지만, 오염지역의 관리가 소홀하거나 주변지역으로 유출시 이 기간 내에 주변 확산과 시간경과에 따른 오염 진행은 커질 것으로 판단된다.

Keywords : Soil contamination prediction, Urban railroad, Pore water pressure, Settlement, Numerical analysis

1. 서 론

최근 들어 인천은 급속한 경제·문화 발전에 따라 보다 쾌적하고 편리한 생활환경 조성을 위해 새로운 도시환경을 조성하는 도시재생사업이 활발히 진행되고 있으며, 이에 따라 토양의 환경에 대한 오염 및 위해성 평가가 중요시 되고 있다. 특히 기존의 재활용처리부지, 공장부지 또는 군부대 주둔지 등이 이전하면서 기존 부지에 누적되었

던 토양오염과 이에 대한 처리에 관한 사항들이 중요하게 부각되고 있다. 그러나 현재까지 각 지자체별 토양오염을 판별하는 관련법은 아직 판단기준이 구체적으로 확립되어 있지 못하여 일부 토양오염을 간과할 우려가 있다(한국환경정책평가연구원, 2002).

토양은 자연생태계가 균형을 이루는데 중추적인 역할을 한다. 자연생태계의 유지기능, 식물 생산기능, 오염물질 정화기능, 저수 및 투수기능, 쾌적한 환경기능 등 환경

1 정회원, 인천대학교 건설환경공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil and Environ. Engrg., Univ. of Incheon)

2 정회원, 인천대학교 건설환경공학과 박사과정, 인천경제자유구역청, 주무관 (Member, Ph.D. Student, Dept. of Civil and Environ. Engrg., Univ. of Incheon)

3* 정회원, 인천대학교 건설환경공학과 연구교수 (Member, Research Professor, Dept. of Civil and Environ. Engrg., Univ. of Incheon, E-mail: frostjun@incheon.ac.kr)

보전 유지기능이 있다. 사업 활동 및 기타 사람의 활동에 따라 토양 오염이 진행된 상태에서의 인위적인 복원은 정화가 힘들 뿐만 아니라 상당한 시간이 소요되는 물론, 경제적으로도 많은 비용이 소요되므로 이러한 문제가 발생하기 전에 쾌적한 토양환경을 보전하기 위한 노력이 필요하다. 따라서 환경 문제를 근본적으로 해결하기 위해서는 국가 및 지자체별 적정 토양보전체제 구축 뿐 아니라 국민 스스로 환경의 중요성과 가치를 알고 개발과 보존의 조화를 이루어낼 수 있도록 참여 의식을 고취할 필요가 있다(신은철과 박정준, 2009).

국내 토양환경보전법은 2010년 개정으로 21개 토양오염물질을 지정하고 토양오염기준을 설정하고 있으나, 선진국에 비하여 그 수가 크게 부족하여 적정 토양오염관리를 위해서는 토양오염물질의 단계적인 확대가 필요하다. 또한 특정토양오염유발시설 설치자는 토양오염조사기관으로부터 시설부지에 대한 주기적 검사를 받아 검사결과 기준 초과시 토양정화 등 시정명령을 하고 있으나 농수시비위생매립지, 기타 유해물질 저장소로부터 대량의 오염물질의 유출로 하천수계 및 토양, 지하수오염이 발생할 가능성이 높아 오염물질의 누출을 원천적으로 차단할 수 있는 제도적 장치가 미흡하다. 그동안 토양보전을 위한 적절한 고려 없이 진행되어 온 개발과 산업발전에 따른 중금속, 유류 등의 사용이 증가하여 다양한 토양오염 물질로 인한 토양오염은 가중되고 있으며 이에 대한 체계적인 대책마련이 필요하다. 따라서 국외기준 등을 참고로 적합한 기준을 확립하고 측정망 개선 등을 통하여 토양오염에 관한 효율적인 적용과 처리가 이루어져야 하는 등 토양오염 관리에 대한 문제점들을 개선하기 위해 제도를 보완할 필요성이 있다(인천광역시, 2010; 한국환경정책평가연구원, 2004; 신은철 등, 2011).

본 연구에서는 인천지역의 지반조사 자료를 수집하여 지질학적 특성 및 수리학적 특성을 분석하였으며, 토양오염 실태조사 자료를 토대로 지반정보의 체계적인 유지 관리 및 효과적인 데이터 분석이 가능하도록 데이터베이스를 구축하였다. 이를 통한 실태 조사결과, 급속한 산업발전 및 도시화에 따른 토양오염의 발생지역이 상당히 존재하였고, 토양오염실태 조사지역외에 토양오염이 심각하게 발생되었던 위치에 대하여 상세조사를 수행하였다. 특히, 불소(F)와 석유계총탄화수소(TPH)의 토양오염 우려기준 초과에 따른 장래 오염의 거동 예측을 위하여 지하수 유동 해석 프로그램을 활용한 대상지역 관측정에서의 오염 장

래예측과 시간 경과에 따른 오염물 예상 분포도 및 진행예측을 3차원으로 나타내었다.

2. 인천지역 토양오염 관리 및 오염분포 현황 분석

2.1 토양오염확산

토양오염은 지하에 침투한 오염 물질이 지표 혹은 지중 토양을 오염시키는 현상으로, 토양은 물론 지하수나 지하 공기 등 지질 중에 존재하는 모든 것이 대상이 된다. 토양오염은 수질오염이나 대기오염에 수반되어 2차 오염현상으로 나타난다. 즉 오염수를 사용하는 지역이나, 대기로부터의 낙진 등에 의하여 토양은 간접적으로 오염되며, 직접적으로는 폐기물의 불법투기, 무절제한 농약의 사용 및 토양의 형질 변경 등으로 토양오염이 가속화된다(박정준, 2007).

토양오염의 실태조사는 대기 혹은 수질환경과 비교해 조사비용과 제도면에서 열악하기 때문에, 오염발견이 늦어져 정화비용과 기간이 많이 소요된다. 토양오염은 대기나 수질오염과는 달리 축적성이 있는 오염현상으로 정화 의무에 대해서 과거까지 소급하여야 하는 특성을 갖고 있다. 따라서, 오염된 토양은 회복되는데 상당한 시간과 노력을 요하게 되어 거의 비가역적으로 오염현상이 악화되며, 오염물질 이동방향에 따라 식생 오염 또는 지하수의 오염의 발생으로 적절한 선행관리가 필수적이다(한국환경정책평가연구원, 2002).

과거에 인간의 건강에 중대한 영향을 끼친 경험에 있는 물질은 흙의 오염물질로서 주의할 필요가 있다. 대표적인 물질로는 카드뮴, 시안, 유기인, 납, 6가크롬, 비소, 수은, 동, PCB 등이 있으며, 이들 이외의 물질 중에서도 흙속에 과도하게 농축되어 있는 인공화학물질 등의 경우에도 충분한 영향권내에 있다. 토양 내 오염물질의 농도가 기준치보다 높거나 환경적으로 유해한 물질이 존재하는 경우에는 그에 따른 여러 문제를 일으킨다. 유해물질이란 생물 및 인간의 건강에 현재 혹은 잠재적으로 악영향을 초래하는 수준 이상의 물질로 정의 할 수 있다. 유해물질은 생성 원으로 보면 자연의 천연물질과 인공의 합성물질로 구분되며 조성으로 보면 무기물질과 유기물질로 구분된다. 지중내에 존재하는 오염물질의 종류에는 생활폐기물, 산업폐기물 같은 폐기물류, 카드뮴, 납, 아연, 구리, 니켈, 6가크롬 등과 같은 중금속류, 황산염, 석면 등과 같은 무기물류, 기름, 타르, 염화탄화수소, PCB, 다이옥신, 농약 등과

같은 유기물질, 천연방사능, 인공방사능 같은 방사능류가 있다.

확산이란 기체분자나 원자, 고체 혹은 액체 상태를 구성하는 원자가 화학포텐셜(chemical potential)차이에 의해 화학포텐셜이 높은 곳에서 낮은 곳으로 구성입자가 이동하는 현상이며, 대부분 농도에 비례한다. 이러한 경우, 단위길이당 농도 변화에 따른 확산 흐름을 예상하는 법칙이 Fick의 법칙이며, 제 1법칙은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_B = -D_B \frac{dC_B}{dx} \quad (1)$$

J 는 단위시간당 단위 면적을 지나는 원자의 수를 나타내는 흐름이고, D_B 는 B 원자의 확산계수, C 는 농도, x 는 방향, dC/dx 는 x 방향으로의 농도 변화율을 나타낸다. 이 식은 정상상태의 경우에만 적용할 수 있다. 이 식으로부터 정상상태에서의 흐름은 일정하게 유지되고, 확산은 농도 경사가 클수록 잘 일어나며 농도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 확산이 일어난다는 것을 알 수 있다.

제 2법칙은 비정상상태(시간에 따라 농도가 변화하는 경우 dC/dt 값이 0이 아닌 경우)의 경우에 시간에 따른 농도 변화를 예측한 법칙으로 식 (2)로 표현할 수 있다.

$$\frac{dC_B}{dt} = -\frac{dJ_B}{dx} \quad (2)$$

J_B 는 Fick의 제1법칙과 같이 표현되는데, 확산계수 D 가 농도에 상관없이 일정한 경우 식 (2)는 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dC_B}{dt} = -\frac{dJ_B}{dx} = D_B \frac{d^2 C_B}{dx^2} \quad (3)$$

식 (3)은 농도의 2차 미분값이 양의 값을 가지는 경우, 그 위치에서는 시간에 따라 B 원자의 농도가 높아짐을 의미하는 것이며, 음의 값을 가지는 경우에는 시간에 따라 감소한다. 즉, 위치에 따른 농도를 그래프로 나타내었을 때, 위로 볼록한 부분(2차 미분값이 0보다 작다)은 시간이 지남에 따라 농도가 감소하고, 아래로 볼록한 부분(2차 미분값이 0보다 크다)은 시간이 지남에 따라 농도가 증가하여 전체적으로 농도가 일정하게 되는 것이다.

2.2 인천지역 토양오염 관리 현황 분석

2009년 인천지역의 토양 측정망은 31개소로 관리망을 운영하고 있으나, 고도의 산업발전에 따른 급변하는 인천의 발전에 따라 당하지구, 청라 경제자유구역, 송도 경제자유구역, 영종 경제자유 구역 등에 더 많은 정보망이 요구되어진다. 토양정보망 현황 분석결과, 남동구에는 남동국가산업단지가 위치해 있어 7개의 측정망이 설치되어 있으며, 서부공단과 수도권매립지가 위치한 서구와 강화도 지역에서는 5개의 측정망이 운영되고 있으나, 인천국제공항의 역할로 급속한 발전을 보이는 영종도 지역의 토양관리 측정망이 1개소, 인천의 145개 도서지역에서는 측정망의 기능을 적용한 곳이 없어 매우 낮은 비율로 운영되므로 향후 추가 측정망이 필요한 것으로 조사되었다.

토양오염 보전법에 따라 시, 도지사는 토양오염이 우려되는 관할 지역에 대하여 전체 조사지역수에서 조사대상 지역 종류별로 구성비를 고려하여 배분한 후 시장, 군수, 구청장에게 통보하고, 시장, 군수, 구청장은 조사지역수에 따라 토양오염 가능성이 높은 지역을 조사예정지역으로 선정한다. 매년 인천은 약 75~86 구역의 토양오염 실태 조사를 실시해왔으며, 토양오염원 17개 항목에 대해 오염 기준 초과에 대해 판단을 하고, 기준 초과 오염지역에 대해서는 복원사업을 수행하고 있다. 인천의 토양실태조사 지점수는 그림 1과 같이 79개소로 전국 광역시에 비하여 측정수가 적은 편임을 알 수 있다.

인천지역 토양오염실태조사에 대한 조사 자료는 자료 기입의 과대함에 따라 오염우려 지역별 토양실태조사 지점수 통계현황과 2001년~2009년까지의 토양오염 실태조사결과 자료를 분석하였다. 2009년 인천지역 토양오염실태 조사에 따른 결과, 토양조사에 따라 81곳을 실태조사 하였다. 토양오염원 수는 2009년 토양보전법에 따라 17개 항목 카드뮴(Cd), 구리(Cu), 비소(As), 수은(Hg), 납(Pb), 6가크롬(Cr^{6+}), 유기인화합물, PCB, 시안(CN), 페놀, 석유

그림 1. 전국 토양오염 실태 조사 지점수

계충탄화수소(TPH), 벤젠, 크실렌에 대하여 실시하였다.

2.3 인천지역 토양오염 분포 및 확산

2.2절에서 제시한 2009년 인천지역의 토양오염 실태조사에 따라 각 오염원에 따라 수치해석 프로그램(Visual Sufer 80)을 이용하여 분석하였다. 그림 2는 2009년 토양

오염 실태조사에 따라 인천지역에 분포되어 있는 오염원의 분포도를 시각화 한 것이다. 토양오염 실태조사에 따라 오염의 수치를 나타내는 12개 항목에 대하여 오염원 분포도를 나타낸 것이다.

카드뮴(Cd)의 오염농도는 부평구와 계양구 일대에서 공장 부지와 산업 지역의 산재로 오염도가 다소 높게 나타났다. 즉, 카드뮴은 제련공장, 도료공장, 분진 등에 의해서

그림 2. 인천지역의 토양오염 분포도(2009년)

오염원이 확산하는데, 부평구와 계양구 일대는 유리 산업 및 제조 산업의 위치함에 따라 오염 집중 경향을 보이는 것으로 판단된다. 구리(Cu)의 오염농도는 남구와 남동구 지역에서 부분적으로 확산이 시작되며, 계양구와 부평구 일대에서는 다소 큰 오염지수를 나타내었다. 이는 금속야금과 합금 및 제련공장이 밀집되어 있는 인천 서부공단과 남동공단이 위치해 있어 공단에서 배출된 오염물질과 매연 및 분진 등으로 오염물질 이동이 쉬운 농지에 축적되어 비교적 높은 농도를 나타낸 것으로 사료된다. 비소(As)의 오염도는 서구 일대에서 분포되어 확산되는 경향을 보였으며, 이는 목재 및 유리 산업의 산재에 따른 결과로 판단하였다. 수은(Hg)의 오염농도는 부평구와 서구 일대에서 분포되어 확산되는 경향을 나타내었으며, 비소와 수은의 오염도는 부평구와 서구 일대에 분포·확산됨을 보였다.

납(Pb)의 오염농도는 서구, 부평구, 남구, 동구 등 산발적으로 오염도가 분포하였으며, 아연(Zn)은 계양구와 서구, 부평구에서 집약되어 주변으로 확산되는 경향을 나타내었다. 니켈(Ni)의 오염농도는 부평구와 계양구 일대에서 오염도가 확산됨을 보였으며, 불소(F)는 연수구, 계양구, 부평구 지역에서 부분적인 확산과 더불어 연수구와 계양구 일대에서 집중적인 오염지수 확산을 보였다.

석유계총탄화수소(TPH)의 오염농도는 부평구 십정동과 서구 석남동 일대에서 집중적인 확산을 나타내었는데, 이는 부평구 미군반환기지과 서구 석남동 일대의 유류 저장소 및 유류 송유관의 분포에 따른 영향인 것으로 판단된다. 현행 토양환경보전법의 토양오염기준에는 규제치가 없으나, 지표환경에서 발생하는 모든 화학적 반응과 관계된 pH의 오염농도 분포는 농업용수를 사용하는 농경지와 과수원 지역이 가장 높게 나타났고, 조사된 대부분지역에서는 일반적인 토양의 pH의 범위인 4~8에서 벗어나지 않았다. 즉, 도로주변과 하천지역은 자동차의 배기가스의 오염원 유입과, 오염물질이 주변하천으로 배출되어 하천수를 농경지에 관개함으로써 여러 중금속들이 흡착되어 있는 상태이기 때문에 pH가 낮아진 것으로 추정된다(신은철과 박정준, 2008).

3. 인천시 주요 토양오염 가능 지역에 대한 조사 결과 및 분석

상기 기술한 바와 같이 인천지역 토양오염실태 조사결과, 급속한 산업발전 및 도시화에 따른 토양오염의 발생지

역이 상당히 존재하였으며, 이 결과와 더불어 토양오염실태 조사지역외에 토양오염이 발생되어 주요 이슈화가 되었던 곳을 오염물질에 따라 조사분석하였다.

3.1 검단일반지방 산업단지 토양환경조사결과 및 분석

토양오염 가능성 지역으로 2008년 검단일반지방 산업단지에 대한 토양실태조사를 그림 3과 같이 실시하였다. 총 62 개수에 대하여 조사 실시하여 토양오염분석 결과 총 4개소에서 토양 오염 관리기준치를 상회하는 결과를 보였다. G1-13지역에서 석유계총탄화수소(TPH)가, G3-20 지역에서는 중금속(구리, 납)성분이, TP-8-2, TP-8-4지역에서는 석유계총탄화수소(TPH) 성분이 관리기준치를 초과 하는 결과를 보여 오염지역으로 선정, 그에 따른 폐기물 처리대책이 필요하다고 판단된다.

3.2 미군 공여구역 주변지역 환경기초조사결과 및 분석

부평 미군 반환 공여지역은 기존 미군의 훈련 및 생활에 따른 유류오염에 따른 토양오염 발생 가능성이 매우 클 것으로 판단하여 구역내 위치에 따라 정밀 조사를 실시하였

그림 3. 검단일반지방산업단지 토양오염조사(2008)

그림 4. 부평구 미군 공여구역 환경기초 조사 구역

다. 그림 4는 부평구내 미군 공여구역의 환경부 캠프마켓 토양실태조사의 측점을 나타낸 것이다. 조사는 2008년 12월 1단계 환경기초조사를 완료하고, 2009년 12월 2단계 환경기초 조사 착수하였다. 조사 구역을 A, B, C, D, E 5개 구역으로 나누어 수행하였으며, A, B, C, D, E 각각의 구역에서 32지점, 18지점, 31지점, 2지점, 4지점 총 87지점에 대해 조사하였다.

조사 결과, A, B, C 구역에서 지목별 오염우려기준을 초과하는 오염이 발견 되었으며, 토양분석결과 유류(TPH, Benzene, Xylene) 및 중금속(Cu, Pb, Zn, Ni) 항목이 지목별 토양오염우려기준을 초과하는 것으로 조사되었다. A 구역은 캠프마켓에서 굴포천 지류와 근접한 BP-26지점은 미군기지 내부에서 발생된 오염이 외부에서 유출된 것으로 판단되고, 부영공원 지역은 과거 68경차부대 운영에 따른 오염 가능성이 큰 것으로 판단된다. B구역의 중금속 중 아연 항목이 오염된 IMOS2065 지점은 타일적재소의 영향으로 판단되며, C구역은 철로 운영 및 무단투기 등 불특정 오염원에 의한 오염가능성이 큰 것으로 판단된다.

3.3 청라지구 원창동 인근 유류 저장소 및 비위생매립장 토양실태조사결과 분석

인천지역 서구 청라지구 원창동 부근 유류저장소 및 송유관주변의 토양조사구역으로, SK인천정유(주), (주)대한항공 저유소, GS칼텍스(주) 윤활유공장, 현대오일뱅크(주) 등 6개의 대형 위험물 기름 저장소가 위치해 있다. 지난 2004년 대한항공 항공유 정유소에서 기름이 누출되는 등 토양 오염의 우려도 계속해서 증가하였다. 2008년 환경관리공단, (재)자연환경연구소에서 유류지역에 대한 토양오염도 조사결과 적합함으로 조사되었으나, 대형 위험물 저장소의 신규 허가 강화, 악취 점점 강화, 저장량 총량제 도입 등 구체적인 관리 체계가 수립되어있지 않아 이에 따른 관리 주요 구역에 대한 개별 관리 체계의 필요성이 요구된다.

인천 서구 청라지구는 과거 80년대 후반 공유지를 매립

하는 과정에서 각종 생활폐기물이 매립됨을 2006년 2월 청라 경제자유구역내 GM대우 청라테크센터(14만5천평) 공사중 발견하게 되었으며, 한국토지공사의 정밀 조사결과 매립된 생활폐기물이 3백만톤 이상인 것으로 추정, 조사되었다. 이는 표 1의 비위생 매립지 조사 현황 중 A지역에 해당되나, 현재 매립장에 대한 공식적 정밀조사가 이루어지지 않아 향후 이 지역을 포함한 기타 인천지역의 토양 보전 관리를 위하여 정밀 조사가 절실히 요구된다.

4. 수치해석을 통한 토양오염 예측

2008년까지 토양오염 기준 초과지점을 조사한 결과로서 2008년 서구 경서동과 서구 원창동에서 불소(F)와 석유계총탄화수소(TPH)의 항목에 대하여 토양오염 우려 기준을 상회하였다. 이렇게 오염원으로서의 잠재적 포텐셜을 지니고 있는 오염토양은 시간 경과에 따라 지하수 및 강우의 유입으로 주변지역에 확산될 가능성이 매우 크다.

인천지역 불소(F)와 석유계총탄화수소(TPH)의 토양오염 우려기준 초과에 따른 장래 오염의 거동 예측을 위하여 지하수유동 수치해석 프로그램(MODFLOW)을 활용하여 오염 예상에 따른 분석지구 관측정에서의 오염 장래예측과 시간의 경과에 따른 오염물 예상 분포도 및 진행 예측을 모델링하여 분석하였다.

유한차분 해석프로그램으로 적용한 MODFLOW는 3차원 유한차분 지하수 유동 모형으로 다양한 수리지질학적 구조를 보다 손쉽게 구현하여 모의할 수 있고 결과를 쉽게 해석할 수 있다. 특히 지하수의 공급, 오염물질의 정화, 광산의 배수 등에 대한 모의에 많이 이용되는 신뢰성이 높은 모형이다. MODFLOW는 사용하기에 쉽고 편리하며 규모가 비교적 큰 수리지질학적 문제를 해결하기 위해 필요한 대용량의 자료를 처리, 분석 및 유지하는 능력이 뛰어나다. 또한 물리적, 수학적인 지하수 유동 형태의 개념이 실제로 어떻게 나타날 것인가에 대해 대용량의 자료와 함께 다루어진다. MT3D는 복잡한 수리지질학적 구조에서의 용질 이동에 대해 널리 이용되는 3차원 유한 차분 수리

표 1. 청라지구내 비위생 매립지 현황

구분	면적	매립심도	추정폐기물량(m ³)	매립시기	폐기물 종류
A 지역	58.10ha	2.8m	1,636,370	80년대 후반 ~ 90년대 초반	생활폐기물 (연탄재 다량 포함)
B 지역	34ha	2~3m (평균 2.5m)	850,000		
C 지역	23ha		575,000		
계	94ha	-	3,061,370	-	-

모형이다. 각각의 용질 이동은 서로 영향을 주는 경우에 대해서도, 그렇지 않은 경우에 대해서도 모두 가능하다. 정류(steady-state flow)와 부정류(transient flow), 이방성 분산(anisotropic dispersion), 일차 감쇄(first-order decay), 용질간의 화학 반응, 선형과 비선형의 흡착 등을 모두 고려하면서 이송에 의한 용질 이동을 모의할 수 있다(Zheng, 1990).

분석지구에 대하여 격자의 수를 설정하였으며, 오염 예상지역으로 선정된 곳에는 표 2와 같이 지점별 초과지점 격자망을 달리하여 좀 더 면밀한 분석을 위해 세분화된 격자망으로 재구성하였다. 현장 주변지역의 물수지분석 및 지층 형태에 따른 토양의 기본 물성과 기상 자료를 수치해석 프로그램에 적용한 각종 입력자료를 얻어 조사지역의 토질 및 수리 특성을 시뮬레이션 하였다. 수치해석 프로그

표 2. 불소 토양오염 우려기준 초과지점 격자망 구성

구분	격자망 구성
전체 크기	1,500m × 1,500m
셀의 수	100 × 100
셀의 크기	7.5m × 7.5m, 15m × 15m

표 3. 해석 프로그램에 적용한 각종 입력자료

입력인자	내 용	비 고
토질의 각 층 형태	1층 : 느슨 모래(불소 적용) 1층 : 조밀 모래(TPH 적용) 2층 : 소성점토 3층 : 조밀모래	
비저류계수(1/m)	1층 : $1.9 \times 10^{-5} \sim 1.3 \times 10^{-5}$ (불소 적용) 1층 : $9.4 \times 10^{-5} \sim 4.6 \times 10^{-5}$ (TPH 적용) 2층 : $1.9 \times 10^{-3} \sim 2.4 \times 10^{-4}$ 3층 : $9.4 \times 10^{-5} \sim 4.6 \times 10^{-5}$	De Weiest(1966)
비산출율(specific yield, %)	1층 : 27, 2층 : 7, 3층 : 25	Johnson(1967)
수리간극률(hydraulic porosity values)	1층 : 0.35, 2층 : 0.45, 3층 : 0.25	Brahana & Mesko(1988)
연 강수량(mm/year)	1,700	기상청(2009)

(a) 30일 후

(b) 1년 후

(c) 5년 후

그림 5. 불소(F)의 표층에서 관측한 경과시간에 따른 오염 경과

램에 적용한 각종 입력자료로 수치해석을 하는데 있어 표 3과 같이 지층 내 토양의 성질 및 특성을 입력하였다. 지반 조사에 따른 지층의 형태는 크게 3개로 나누어 볼 수 있으며, 연강수량은 연 강수량을 1,700mm/year로 기상청의 연간 평균 강수량을 이용하여 매개변수로 적용하였다.

4.1 불소 토양오염 우려기준 초과지점의 토양오염 장래 예측

그림 5는 표층에서 관측된 경과시간 30일~약 5년 후 토양오염 진행 경과로 유출수의 흐름은 상부로 이어진다. 오염원에 대한 10일 경과와 농도는 약 40mg/l까지 농도가 최대로 집약됨을 볼 수 있다.

토양오염원의 확산을 3D로 표현하여 지층 내 3차원적인 오염의 진행을 예측할 수 있다. 그림 6은 불소 오염원의 확산 시작 후 은 30일에서 5년 경과에 따라 오염원의 확산 및 흐름 진행을 3D로 표현한 것이며, 오염의 흐름 방향인 녹색 실선에 따라 오염도는 진행을 한다. 시간의 경과에 따라 오염의 정도는 주변으로 확산되며 이동하는 것을 예측 할 수 있다.

(a) 30일 후

(b) 1년 후

(c) 5년 후

그림 6. 경과시간에 따른 3차원적 오염 경과

(a) 30일 후

(b) 1년 후

(c) 5년 후

그림 7. 석유계총탄화수소(TPH)의 표층에서 관측한 경과시간에 따른 오염 경과

(a) 30일 후

(b) 1년 후

(c) 5년 후

그림 8. TPH의 경과시간에 따른 3차원적 오염 경과

4.2 석유계총탄화수소 토양오염 우려기준 초과지점의 토양오염 장래 예측

인천시 석유계총탄화수소(TPH) 토양오염 우려기준 초과에 따른 장래 오염의 거동 예측을 위하여 지하수유동 수치해석 프로그램을 활용하여 오염 예상에 따른 분석지구 관측정에서의 오염 장래예측과 시간의 경과에 따른 오염물 예상 분포도 및 진행도를 모델링 절차를 통하여 분석하였다.

그림 7은 표층 관측 30일~약 5년의 오염 진행 경과로 유출수의 흐름은 상부로 이어진다. 오염원에 대한 30일 경과 농도는 약 20mg/L까지 농도가 최대로 집약됨을 볼 수 있다.

석유계총탄화수소(TPH)는 물과 혼합되지 않고 그 형태를 유지하는 수용액체로써 지하에 유출되면 형태를 그대로 유지하며 토양과 지하수를 동시에 오염시키는 특징을 지닌다. 비수용성 액체인 석유계총탄화수소는 휘발성이어서 지속적으로 휘발하여 공기를 오염시키고 지상의 인간

에게 영향을 미칠 수 있다. 이와 같은 석유계총탄화수소로 오염된 토양은 수질오염뿐 아니라 공기오염을 야기할 수 있고, 실내로 침투할 경우 실내공기를 오염시킬 수 있으므로 각별한 주의가 필요할 것으로 판단된다.

토양오염원의 확산을 3D로 표현하여 지층내 3차원적인 오염의 진행을 예측할 수 있다. 그림 8은 TPH 오염의 확산 시작 후 30일에서 5년 경과에 따라 오염원의 확산 및 흐름 진행을 3D로 표현한 것이며, 오염의 흐름 방향인 녹색 실선에 따라 오염도는 진행을 한다. 유출에 따른 오염원 및 유출 오염물의 진행은 유출경로에 따라 다르기 때문에 오염의 진행은 지하수 및 유수의 유출 경로와 흡사함을 알 수 있다. 따라서 유출의 진행과 확산에 큰 조건인 지층에 대한 수두차 및 지층간 존재하는 토질 특성이 영향을 크게 미친다고 판단하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 인천지역의 지반조사 자료를 수집하여 지질 및 수리학적 특성을 조사 분석하였고, 토양오염 실태조사 자료를 토대로 데이터베이스 구축을 통한 자료를 이용하여 인천지역의 토양오염 분포도를 통해 지반오염 특성을 평가하고, 특정 토양오염 우려지역의 오염 특성에 대한 장래예측을 3차원으로 나타내어 다음과 같이 결론을 도출하였다.

- (1) 인천지역의 불소(F) 토양오염 우려기준 초과지점에 대한 수치해석 프로그램 결과, 경과시간 1년 후의 오염원 농도가 470mg/L로 최대의 농도로 오염지수를 나타낼 것으로 예상되며, 약 1400일을 기점으로 농도는 점차 희석되며 주변으로 확산 된다. 약 10년 후인 3650일 경 오염원의 농도는 주변으로 넓게 확산되지만, 점차 희석되어 오염농도가 감소되는 경향을 보였다.
- (2) 석유계총탄화수소(TPH) 토양오염 우려기준 초과에 따른 장래 오염의 거동 예측 결과, 경과시간 1년 후 TPH 오염원의 농도는 500mg/L까지 최대 오염지수로 예상되며 이 기간까지 오염원의 농도는 점차 높아져 간다. TPH의 토양오염우려기준인 400mg/L는 약 1년 후까지는 기준을 초과하여 토양오염 보전법의 토양오염 규제 기준에 부적합하지만, 1년을 기점으로 오염원의 농도는 점차 희석되어 주변으로 확산된다. 약 10년 후인 3650일 경 오염원의 농도는 주변으로 넓게 확산되지만, 점차 희석되어 농도분포가 감소됨을 나타내었다.

- (3) 본 연구에서는 토양실태조사와 해석을 통해 인천지역 오염원 대한 토지용도, 지역, 시간 등의 변화에 따른 오염분포 및 농도 변화 예측결과, 향후 약 10년까지 지층내 오염원으로서의 잠재적 포텐셜을 지니고 있는 오염된 토양은 시간 경과에 따라 지하수 및 강우의 유입으로 주변지역에 확산될 가능성이 예측되어, 지역토양환경보전계획에 의거 인천지역의 지질 및 오염물질 특성에 적합한 최적의 오염토양복원기술이 적용되어야 한다.
- (4) 오염된 토양을 개선하기 위한 기초작업으로 프로그램을 활용하여 토양오염도를 작성함과 더불어 인천지역의 토양오염 측정망을 이용하여 인천지역의 토양오염 상태를 파악하고 장래 토양보전을 위해 기업의 환경정보지원을 위한 토양관리 체제 및 장래 토양 복원에 기여하리라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 인천녹색환경지원센터의 2010년도 연구개발사업비 지원(과제번호 3)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 기상청 (2009), *기상연감*.
2. 박정준 (2007), “연직배수재를 이용한 토양세정시스템의 오염토양정화 특성”, *한국환경복원녹화기술학회지*, 제10권, 제5호, pp.76-86.
3. 신은철, 이성철, 박정준 (2011), “수치해석 방법에 의한 연직배수시스템의 오염토양 복원효율 비교분석”, *한국토목섬유학회논문집*, 제10권, 제1호, pp.1-8.
4. 신은철, 박정준 (2009), *최신 지반환경공학*, 씨아이알.
5. 신은철, 박정준 (2008), “GIS기법을 이용한 인천지역의 토양오염도 평가”, *한국환경복원녹화기술학회지*, 제11권, 제3호, pp.10-18.
6. 인천광역시 (2010), *환경보전중기종합계획*.
7. 한국환경정책평가연구원 (2002), *토양오염지역의 관리 및 복원방안*, KEI 2002 RE07.
8. 한국환경정책평가연구원 (2004), *오염토양부지의 정보관리체계 효율적 방안*, KEI 2004 RE09.
9. Brahana, J.V., Mesko, T.O. (1988), *Hydrogeology and preliminary assessment of regional flow in the Upper Cretaceous and adjacent aquifers*, northern mississippi embayment: U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 87-4000, p.65.
10. De Weiest, R. J. M. (1966), *On the storage coefficient and*

the equation of groundwater flow in nonuniform homogeneous media, Water Resources Research 71-4.

11. Johnson, A. I. (1967), *Specific yield-compilation of specific yields for various materials*, U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1662-D. 74.
12. Zheng, C. (1990), *A modular three-dimensional transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in ground water systems*, S.S. Papadopoulos & Associates, Inc.

(논문접수일 2012. 5. 9, 심사완료일 2012. 6. 18)