

지하수 오염우려지역 실태조사 보고서 기반의 사전 부지개념모델 구축

김주희^{1,2} · 배민서^{1,2} · 권만재^{1,2} · 조호영^{1,2} · 이순재^{1,2*}

¹스마트 지중환경 관리 기술 연구단

²고려대학교 지구환경과학과

Construction of a Preliminary Conceptual Site Model Based on a Site Investigation Report for Area of Concerns about Groundwater Contamination

Juhee Kim^{1,2} · Min Seo Bae^{1,2} · Man Jae Kwon^{1,2} · Ho Young Jo^{1,2} · Soonjae Lee^{1,2*}

¹SMART-SEM (Subsurface Environment Management) Research Center

²Department of Earth and Environmental Science, Korea University

ABSTRACT

The conceptual site model (CSM) is used as a key tool to support decision making in risk based management of contaminated sites. In this work, CSM was applied in Jeonju Industrial Complex where site investigation for groundwater contamination was conducted. Site background information including facility types, physical conditions, contaminants spill history, receptor exposure, and ecological information were collected and cross-checked with tabulated checklist necessary for CSM application. The CSM for contaminants migration utilized DNAPL transport model and narrative CSMs were constructed for source to receptor pathway, ecological exposure route, and contaminants fate and transport in the form of a diagram or flowchart. The component and uncertainty of preliminary CSM were reviewed using the data gap analysis while taking into account the purpose of the survey and the site management stage at the time of the survey. Through this approach, the potential utility of CSM was demonstrated in the site management process, such as assessing site conditions and planning follow-up survey work.

Key words : Groundwater contaminant, site management, site investigation, Preliminary conceptual site model, Data Gap

1. 서 론

국내에서 지중환경 오염은 토양, 지하수, 폐기물 등 매체 위주의 관리가 시행 중이다. 이에 따라 지하수 오염의 경우 지하수법[시행 2020. 12. 8.] [법률 제17618호, 2020. 12. 8., 타법개정]에 의거하여 관리되고 있으며, 토양오염의 경우 토양환경보전법[시행 2020. 5. 27.] [법률 제16613호, 2019. 11. 26., 일부개정]에 의거하여 관리되고 있다. 이들 지중환경의 오염 관리 정책은 지하수관리 기본계획(2012~2021) 및 토양보전 기본계획을 기반으로 수립되어왔다.

최근 수립된 제2차 토양보전기본계획은 적절한 관리·보전으로 토양환경 건강성 증진을 목표로, 토양 오염 조사와 관련한 토양환경평가의 단계적 의무화, 지중환경 조사 정화 검증 체계 구축 추진 등과 함께 토양·지하수 통합 관리를 위한 법령 개편에 대한 내용을 기본계획 내에 포함하고 있다. 이렇듯 기존의 지중환경 오염에 대한 매체위주의 관리에서 토양 및 지하수를 통합하는 부지단위의 오염관리 체계로의 변화 움직임이 진행되고 있다. 실제로 오염우려지역을 대상으로 시행되는 토양환경 조사는 2004년 이후 환경공단에서 토양 지하수 환경조사의 형태로, 토양과 지하수의 오염을 함께 조사하고 있으며, 이의 방법 및 절차는 토양정밀조사 지침을 준용하고 있다.

미국, 독일, 일본 등의 국가에서는 부지 단위의 오염 조사 및 관리가 시행되고 있으며, 각 단계에서 위해도 기반의 의사결정이 이루어지고 있다(USEPA, 2011). 부지개념 모델(Conceptual Site Model, CSM)은 위해도 기반의 오

주저자: 김주희, 석사과정

공저자: 배민서, 석사과정; 권만재, 교수; 조호영, 교수

*교신저자: 이순재, 교수

Email: soonjam@korea.ac.kr

Received : 2022. 06. 24 Reviewed : 2022. 06. 28

Accepted : 2022. 07. 18 Discussion until : 2022. 08. 31

염부지 관리를 위해 개발된 의사결정 지원 도구로서, 오염부지에서 수행되는 조사를 기반으로 오염원, 오염경로, 수용체에 대한 해석의 결과이다. 부지의 오염조사가 단계적으로 진행되는 부지 관리과정에서 지속적으로 갱신되는 최신의 조사 결과는 부지개념모델 개선에 반영되기 때문에, 부지개념모델은 생생한 부지 정보를 이해하는데 유용하다(ITRC, 2018). 부지개념모델은 부지관리 각 단계별 의사결정과정에서 조사의 미흡사항을 확인하고, 후속 조사 계획을 수립하는데 사용된다. 이렇듯 부지개념모델은 오염부지 관리를 위한 핵심요소로서 많은 국가에서 활발히 개발되고 있으며, 효율적 운영 및 제도 정착을 위한 노력이 진행 중이다. 부지개념모델은 부지관리 단계에 따라 조사 항목 및 자료의 해상도가 증가하면서 지속적으로 발전할 수 있다(USACE, 2012). 부지개념모델은 사전 부지개념모델(Preliminary CSM) 혹은 기초 부지개념모델(Baseline CSM) 작성을 시작으로, 이후 개황(Characterization) - 정밀(Design) - 정화/완화(Remediation/Mitigation) - 관리(Post Remedy) 등의 부지관리 단계에서 추가되는 조사결과를 바탕으로 지속적인 개선이 가능하다(USEPA, 2011).

국내의 토양과 지하수 오염은 잠재오염파악, 조사, 복원의 단계로 구성된 관리 체계에 따라 관리된다. 이중 조사 단계에서 지하수조사, 지하수이용실태조사, 토양정밀조사, 토양환경평가 등의 조사제도를 통해 지중환경의 오염상황에 대한 상세한 정보를 확보하게 된다. 이러한 정보는 후속 조사 뿐만 아니라 복원, 검증 단계에서까지 중요한 참고 자료가 될 수 있어서, 오염부지 관리가 진행되는 과정에서 축적된 조사결과에 대한 통합적 자료관리가 중요하다. 더 나아가 오염이 이미 발생된 부지 뿐만 아니라 오염 우려지역도 관리하는 국내 환경법에서는 오염이 발생되기 전의 부지에서 조사된 자료 역시 중요한 관리대상 자료가 된다. 오염우려지역을 대상으로 실시되는 실태조사의 경우, 조사 결과에 따라 향후 오염부지로 전환될 가능성이 있으므로, 이 조사결과는 초기의 부지개념모델 작성에 활용될 수 있다.

실태조사 결과를 기반으로 작성되는 부지개념모델은 사전 부지개념모델(Preliminary CSM)에 해당한다. 사전 부지개념모델은 부지의 전반적인 검토를 위해 기존의 정보를 엮는 시작점 역할을 하며, 기존 정보 양에 따라 사전 부지개념모델의 복잡성이 결정되는데, 부지 소지자와 이해관계자 인터뷰, 과거 또는 현재의 (수리)지질학적 정보, 그 이외의 정보(항공 사진, 기 환경조사 DB(Database), 소유주 정보 등)에 대한 통합이 필요하다. 이러한 정보에

대한 평가와 종합을 통해 관계자들이 사전 부지개념모델을 구축하고 제시할 수 있다(NTEPA, 2013).

본 연구에서는 국내에서 시행된 지하수 오염우려지역 실태조사 보고서를 기반으로 사전 부지개념모델을 구축하여 그 작성사례를 확보하고, 지중환경오염 관리제도 개선 방안으로서 부지개념모델 작성의 유용성을 확인하였다.

2. 전주 산업단지 오염우려지역 실태조사 보고서

국가산업단지인 전주 제 1,2 산업단지를 연구지역으로 선정하였다. 해당 지역은 토양지하수 환경조사의 오염우려지역들 중 하나로 선정되어 조사가 완료되었으며 이에 대한 조사 보고서(K-eco, 2018)가 작성된 바 있다. 본 연구에서는 해당 자료의 공개 요청을 통해 확보하여 부지개념모델 구축에 활용하였다. 조사 영역은 전주 제 1,2 산업단지를 포함하는 전라북도 전주시 덕진구 일대로, 2009, 2013년 전주 국가산업단지를 대상으로 수행된 토양 및 지하수 환경조사에서 TPH 및 아연의 오염이 확인되었으며, 2018년 지하수 오염 우려지역 실태조사에서 TCE, PCE에 의한 지하수 오염이 확인되었다. 해당 부지는 실태조사 결과 토양 및 지하수 오염을 조기에 발견하였으나, 확인된 오염도가 심각하지 않아 오염부지로 규정되지 않았다.

실태조사 대상 부지는 오염부지로 규정되기 이전의 상태이기 때문에 부지개념모델이 필수적으로 작성되어야 하는 것은 아니다. 하지만 실태조사에서 오염이 확인되어 오염정화 명령이 내려지는 경우, 실태조사의 결과는 기초조사에 포함되기 때문에, 실태조사 단계부터 부지개념모델을 작성하는 것이 통합적 자료 관리 측면에서 효율적일 수 있다.

2.1. 조사 정보 요약(Profiles)

전주 산업단지 오염우려지역 실태조사 결과로 얻은 정보를 유형별로 구분하였다. 시설 및 부지 정보(Facility Profiles)는 인공적인 특징과 오염부지 부근의 잠재적 오염원을 나타내는 정보, 부지 특성(Physical Profiles)은 유출, 운송 및 거동, 접근성에 영향을 미치는 자연적인 요인, 오염 유출/확산(Release Profiles)은 오염물질의 이동과 범위, 토지이용과 노출 특성(Land use and Exposure Profiles)은 가능한 노출 시나리오, 수용체, 수용체 위치 등을 식별하고 평가하는 데 필요한 정보, 생태 및 문화적 자원(Ecological and Cultural Resources Profiles)은 현장 부근의 자연적 서식지나 생태계 수용체 정보를 포함한다.

Table 1. Profiles for Jeonju site investigation in 2018

Profiles 구분	요약 내용
시설 및 부지 정보 (Facility Profiles)	<ul style="list-style-type: none"> - 오염 유출 지점: TCE 관련업체 & 미확인 잠재오염원 - 시설: 조사지역 내 특정토양오염관리대상시설, 위험물 및 유독물 제조 등 취급 사업장, 폐수배출시설
부지 특성 (Physical Profiles)	<ul style="list-style-type: none"> - 암상: 중생대 백악기 편상화강암(기반암), 제4기 충적층이 넓게 피복하고 있음 - 지하수 심도: 해수면 기준으로 10~15 m 범위에 형성 - 지하수 흐름: 지형 경사를 따라 황방산(197 m)이 위치한 남서-북동 방향, 전주천으로 향함. 전주천은 북류하여 만경강으로 유입 - 지하수위 경향성: JJMW-3 1개월 지하수위 측정 시, 12.58~12.82 m(평균 12.69 m) - 투수계수: $9.37 \times 10^{-6} \sim 2.64 \times 10^{-4}$ cm/sec(기하평균: 1.10×10^{-4} cm/sec) - 주 대수층은 토사 및 풍화대층 구간에 해당하지만 모래 및 실트층 특성(낮은 투수성)을 보임 - 함양 및 배수 지역의 위치: 서쪽 및 북서쪽에 전주천이 북류하여 만경강으로 유입 - 지하수 흐름: 강우에 의한 지하수위 변화가 거의 없으므로 비포화대에서 오염물질의 수직적 이동은 크지 않을 것임
오염 유출/확산 (Release Profiles)	<ul style="list-style-type: none"> - 물질: 주요 오염항목 TCE, PCE - 발견 날짜: 2018년 8월, 11월 - 오염원: 불포화 토양/포화대/암반의 잔류 염화유기용제(자유상 염화유기용제는 미확인) - 경로: 불포화대에서 자유상 염화유기용제의 침투, 포화대 내에서 자유상 염화유기용제의 공극 및 불연속면(절리, 균열)을 따라 수직적 유동, 암반층 내 잔류상 염화유기용제가 물에 용해, 지하수내 용해상 오염물질의 운송 가능성. - COCs(오염물질) <ul style="list-style-type: none"> · 지하수 내 오염물질: 28지점의 지하수 수질 측정 시 TCE는 1개 지점에서 0.08 mg/L, PCE는 2개 지점에서 0.012~0.02 mg/L의 농도로 지하수 수질 기준을 초과, 비소 소량 검출(수질기준 이하). · 토양: 전주 제1,2 산업단지를 대상으로 토양 및 지하수 환경조사(환경부, 2009, 2013)에서 토양내 아연과 TPH 오염 지역 확인됨(TCE, PCE 오염은 미확인) · 파쇄암반대: TCE, PCE 오염 추정됨(미확인) - 우선적 경로: DNAPL 이므로 토사/풍화대층에서는 공극을 따라 수직적으로 이동하며 암반층에 도달한 후에는 암반층의 불연속면을 따라 하류부로 흘러간 후 오염물질이 이동, 확산 가능
토지이용과 노출 특성 (Land Use and Exposure Profiles)	<ul style="list-style-type: none"> - 지하수 사용: 농어업용 14공, 생활용 94공, 공업용 42공의 관정, 음용 지하수 시설 없음. - 지표수체: 산업단지 반경 2 km 정도에 전주천 위치함 - 주거용 건물: 산업단지 반경 2 km 이내에는 주거지 및 공업지가 대부분을 차지/충적층이 발달한 북쪽은 농경지 형성 - 200 ft(~60 m) 이내의 모든 공공 이용 공간 확인: 조사지역은 국가산업단지 일대, 호남고속도로의 전주 IC가 남동지역에 위치 - 과거와 현재의 부지 이용/상태: 주로 공업지역과 교통시설지역 - 부지 및 인접 지역 특성: 부지(산업단지, 녹지공간은 전혀 분포하지 않음). 북쪽 근접지(농경지 형성). 동쪽 근접지(남동쪽 호남고속도로의 전주 IC위치, 주거지역). 남쪽 근접지(황방산 위치, 주거지역). 서쪽 근접지(주거지역)
생태 및 문화적 자원(Ecological and Cultural Resources Profiles)	<ul style="list-style-type: none"> - 서식지 유형: 부지 내 녹지공간 분포 없음

2.2. 주요 경로 분석 (오염원-거동경로-수용체)

실태조사 보고서의 보고 사항 중 부지개념모델을 정의하는 구성요소인 오염원, 거동경로, 수용체에 해당하는 정보를 분석하였다. 전주 산업단지 내 TCE 관련업체와 미확인 지점이 잠재적 오염 유출 위치로 보고되었다. 자유상 NAPL 오염원은 조사결과에서 관측되지 않았으나, 채취된 지하수 성분 분석 결과에서 염화유기용제가 검출되어 지하수 포화대의 오염이 확인되었다. 지하수 오염 상황과 TCE의 거동 특성을 고려하여 대수층내 잔류상 NAPL 오염원의 존재 가능성을 추정하였다. 토양조사는 실시하지 않았으므로 불포화대 오염은 확인되지 않았으나,

DNAPL인 TCE의 일반적인 지중환경내 거동특성에 기반하여 토사, 풍화대 뿐만 아니라 암반층에서도 TCE 오염의 개연성이 높을 것으로 보고하였다. 부지 내 이용 관정이 확인되었으며, 이는 양수된 지하수의 이용 과정에서 인간 수용체에게 오염이 노출될 수 있는 주요 노출 경로로 고려할 수 있다.

요약된 오염원, 거동경로, 수용체 정보를 기반으로 경로 분석을 수행하였다(Table 2). ITRC(2018)에서 제공되는 체크리스트는 오염원-거동경로-수용체에 대한 경로 분석을 용이하게 하도록 돕는 역할을 할 수 있었다. 본 체크리스트는 LNAPL 오염부지에 한정되어 적용할 수 있으며

Table 2. Conceptual site model checklist relating sources to potential receptors through relevant pathways of Jeonju site (■ : contents are confirmed, ※ : contents are probable but not actually confirmed)

유출 위치 — Containment로부터 방류/유출(Spill/Release)되는 염화유기용제	
<input type="checkbox"/> 제품저장시설 <input type="checkbox"/> 배관/유선 ※ 산업 <input type="checkbox"/> 폐기물관리시설 <input type="checkbox"/> 배수로, 저수지 ■ 기타/미확인	
※ 자유상 NAPL 오염원 — 흐를 수 있는 염화유기용제	
<input type="checkbox"/> 지표 <input type="checkbox"/> 지표에서 염화유기용제의 흐름과 pooling	
지표유출에 의한 운송(GRAVITY-DRIVEN FLOW)	
<input type="checkbox"/> 지형에 의한 염화유기용제의 수평적 유동 <input type="checkbox"/> 지표수의 흐름에 의한 염화유기용제의 수평적 유동(강우 혹은 계절적 물의 흐름) <input type="checkbox"/> 조석순환 중 염화유기용제의 수평적 유동	
휘발에 의한 운송	
<input type="checkbox"/> 지표에서 염화유기용제로부터 증기의 발생	
인간 수용체 경로	
<input type="checkbox"/> 지표에서 염화유기용제에 접촉 노출 <input type="checkbox"/> 염화유기용제의 증기 흡입	
잠재적 생태 수용체	
<input type="checkbox"/> 육상 식물(허브/풀) <input type="checkbox"/> 파충류 및 양서류 <input type="checkbox"/> 육상 무척추동물(지렁이 및 곤충) <input type="checkbox"/> 야생동물(조류 및 포유류)	
지표수 / 퇴적물	
<input type="checkbox"/> 흐르지 않는 지표수(연못, 호수, 기타) <input type="checkbox"/> 담수 <input type="checkbox"/> 연속적으로 흐르는 지표수(하천, 강, 기타) <input type="checkbox"/> 기수(해수와 담수가 혼합된 곳의 물) <input type="checkbox"/> 조수의 영향을 받는 지표수 <input type="checkbox"/> 해수 <input type="checkbox"/> 계절에 따라 존재하는(임시) 지표수	
이류/분산에 의한 운송(WATER-DRIVEN FLOW)	
<input type="checkbox"/> 지표수 위의 염화유기용제 혹은 Sheen(광택이 나는 기름 띠)의 움직임	
인간 수용체 경로	
<input type="checkbox"/> 물/퇴적물 중의 염화유기용제에 대한 접촉 노출 <input type="checkbox"/> 식물(표면)의 염화유기용제에 대한 접촉 노출	
잠재적 생태 수용체	
<input type="checkbox"/> 수생 식물(습지 풀; 맹그로브) <input type="checkbox"/> 파충류 및 양서류 <input type="checkbox"/> 수생 무척추동물 및 물고기 <input type="checkbox"/> 야생동물(조류 및 포유류)	
비포화대 토양	
※ 염화유기용제의 지표와 지하수면 사이의 수직적 유동	
GRAVITY-DRIVEN FLOW에 의한 운송	
※ 비포화 토양으로 염화유기용제 누출	
WATER-DRIVEN FLOW에 의한 운송	
<input type="checkbox"/> 하향의 빗물 침투를 통한 염화유기용제의 번짐 현상(Smearing) <input type="checkbox"/> 일시적 수직 변동으로 인해 지하수면 경계에서 비포화 토양으로의 염화유기용제의 번짐 현상(Smearing)	
인간 수용체 경로	
<input type="checkbox"/> 토양 중의 염화유기용제에 대한 접촉 노출	
잠재적 생태 수용체	
<input type="checkbox"/> 표면이나 뿌리영역에 염화유기용제가 있는 경우가 아니면 식물에 적용할 수 없음; 지표의 경우를 참조 <input type="checkbox"/> 굴을 파는 동물	
지하수 포화대	
<input type="checkbox"/> 염화유기용제의 수평적 유동 ※ 염화유기용제의 수직적 유동	
GRAVITY-DRIVEN FLOW에 의한 운송	
※ 공극을 통한 염화유기용제의 수직적 유동 ※ 불연속면(절리, 균열)을 통한 염화유기용제의 수직적 유동 <input type="checkbox"/> (암반)경계부의 경사를 따르는 염화유기용제의 수평적 유동	

Table 2. continued

인간 수용체 경로 ※ 추출된 지하수의 염화유기용제에 대한 접촉/섭취 노출
잠재적 생태 수용체 <input type="checkbox"/> 뿌리영역에 염화유기용제가 있는 경우가 아니면 식물에 적용할 수 없음; 지표의 경우를 참조
■ 잔류상 NAPL 오염원 — 매체에 갇힌 부동의 NAPL
지표 토양 <input type="checkbox"/> 토양에 잔류된 염화유기용제 (풍화되고, 농도가 낮을 가능성이 높음)
직접 노출에 의한 운송 <input type="checkbox"/> No transport driver
인간 수용체 경로 <input type="checkbox"/> 얇은 토양의 잔류 염화유기용제에 대한 접촉, 우발적 섭취 및 흡입 노출 <input type="checkbox"/> 농작물-뿌리 채소의 섭취
생태 수용체 <input type="checkbox"/> 영향 받은 식물(죽거나 스트레스받은) <input type="checkbox"/> 퇴화된 토양질(염화유기용제로 뒤덮인 토양)
비포화 토양 <input type="checkbox"/> 토양 내 잔류 염화유기용제 (풍화되고, 농도가 낮을 가능성이 높음)
휘발에 의한 운송 <input type="checkbox"/> 영향을 받은 지하 토양으로부터 증기 발생
용해에 의한 운송(WATER-DRIVEN FLOW) <input type="checkbox"/> 빗물 침투에 의해 용해가능한 염화유기용제의 하향 유동
인간 수용체 경로 <input type="checkbox"/> 증기를 통한 섭취 노출
생태 수용체 <input type="checkbox"/> 굴을 파는 동물
대수층 내 토양 ■ 토양 내 잔류 염화유기용제 (풍화되고, 농도가 낮을 가능성이 높음)
용해에 의한 운송(WATER-DRIVEN FLOW) ■ 용해성 염화유기용제 성분이 물에 용해 <input type="checkbox"/> 지하수 양수로 인해 용해된 염화유기용제 성분의 수평적 운송
인간 수용체 경로 ※ 추출된 지하수에서 용해성 염화유기용제 성분에 대한 접촉 및 섭취 노출 <input type="checkbox"/> 굴착 중 지하 토양과 접촉 노출
생태 수용체 <input type="checkbox"/> 염화유기용제가 뿌리 영역에 있지 않으면 적용할 수 없음; 지표 토양의 경우를 참조
퇴적물 및 하천 주변 침전물의 영역 <input type="checkbox"/> 퇴적물 내 잔류 염화유기용제 (풍화되고, 농도가 낮을 가능성이 높음)
용해에 의한 운송 <input type="checkbox"/> 용해성 염화유기용제 성분이 물에 용해
인간 수용체 경로 <input type="checkbox"/> 퇴적물에 대한 접촉 노출 <input type="checkbox"/> 어류 섭취
생태 수용체 <input type="checkbox"/> 영향받은 식물(죽거나 스트레스받은) <input type="checkbox"/> 영향받은 지중 미생물 <input type="checkbox"/> 파충류 및 양서류 <input type="checkbox"/> 어류 및 수생 동물
압반 ■ 압반 내 잔류 염화유기용제
용해에 의한 운송 ■ 용해성 염화유기용제 성분이 물에 용해
인간 수용체 경로 ※ 추출된 지하수에서 용해성 염화유기용제 성분에 대한 접촉 및 섭취 노출
생태 수용체 <input type="checkbox"/> 염화유기용제가 뿌리 영역에 있지 않으면 적용할 수 없음; 지표 토양의 경우를 참조

로, 전주 산업단지 부지의 우려오염물질인 DNAPL의 거동특성에 따라 체크리스트 양식을 수정하여 적용하였다.

3. 사전 부지개념모델 작성

조사 정보 요약(Profiles)과 주요 경로 분석(오염원-거동 경로-수용체) 결과를 기반으로 표 및 흐름도로 부지개념 모델을 작성할 수 있다. 또한 운송 및 거동과정, 노출경로 및 오염분포 등에 주목하여 강조한 부지개념모델을 작성할 수 있으며, 이는 주제에 따라 흐름도, 표, 다이어그램 및 그림으로 작성될 수 있다.

3.1. 오염원-경로-수용체 CSM

오염원-거동경로-수용체에 중점을 둔 부지개념모델의 경우 다음과 같은 도표의 형식 안에 해당되는 부지 정보를 채워 넣어 구축하는 것이 용이하다. 오염원 부분은 원인 시설, 오염원의 상태 및 위치에 따라 구분하였으며 오염원으로부터 거동할 수 있는 경로를 제시하고 수용체에게 노출될 수 있는 노출 경로와 노출 경로에 따른 수용체를

구분하여 부지 정보를 기입하였다.

전주 산업단지에 대한 오염원-경로-수용체 부지개념모델은 앞서 주요 경로 분석을 해석한 결과를 고려하여 작성할 수 있다. 오염원 관련 시설에는 TCE 관련 업체와 미확인 오염원이 잠재적 오염원으로 보고된 바 있었다. 오염원의 상태는 자유상 및 잔류상 NAPL로 구분할 수 있으며 위치는 각각 비포화대 및 포화대, 포화대 및 암반층으로 정리해 볼 수 있다. 경로 구간에 대해서, 비포화 토양 내 자유상 NAPL 오염원은 누출이라는 경로를, 포화대 내 자유상 NAPL 오염원은 공극 및 불연속면을 통한 수직적 유동이라는 경로를 서술할 수 있다. 포화대 및 암반층 내 잔류상 NAPL 오염원은 용해성 성분이 물에 용해되어 이동할 가능성을 기입하였다. 수용체 구간에 대해서, 노출 경로는 부지 내 관정들로 인해 지하수에 용해된 오염물질 및 염화유기용제 오염물질 자체에 노출될 가능성이 있다고 판단하였다. 수용체로 생각해볼 수 있는 대상들은 노출 경로를 고려하였을 때 지하수 및 지표수 이용자와 농경지, 산업단지, 주거지와 같은 관정사용 시설 등이 있다.

Table 3. Source-pathway-receptor conceptual site model of Jeonju site

오염원			경로	수용체	
시설	상태	위치		노출 경로	수용체
<ul style="list-style-type: none"> TCE 관련 업체 미확인 잠재오염원 	자유상 NAPL	비포화대	비포화토양으로 염화유기용제 누출	<ul style="list-style-type: none"> 지하수 염화유기용제 	<ul style="list-style-type: none"> 지하수 및 지표수 이용자 관정사용 시설(농경지, 산업단지, 주거지) 기타
		포화대	공극을 통한 염화유기용제의 수직적 유동 불연속면(절리, 균열)을 통한 염화유기용제의 수직적 유동		
	잔류상 NAPL	포화대	용해성 염화유기용제성분이 물에 용해		
		암반층	용해성 염화유기용제성분이 물에 용해		

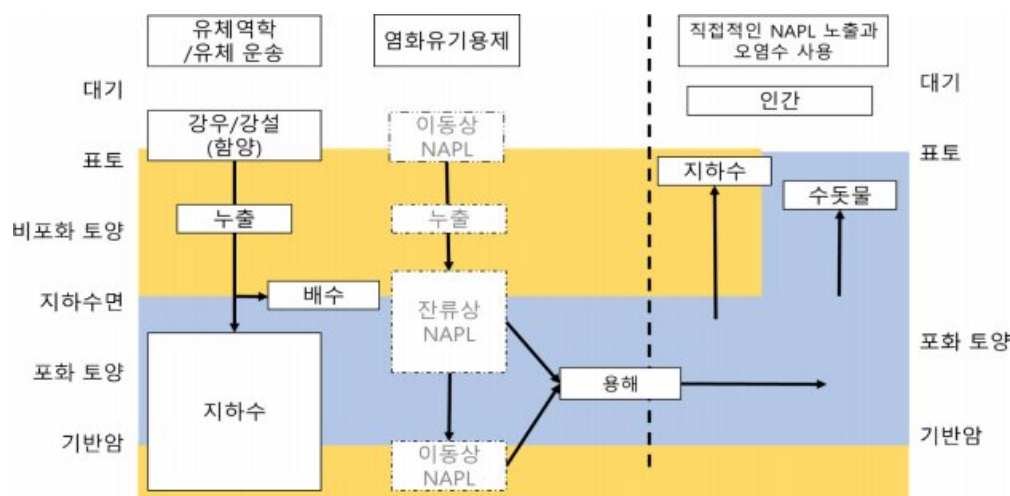


Fig. 1. Fate and transport conceptual site model of Jeonju site (gray dotted box: fate and transport of contaminants that are probable but not actually confirmed).

3.2. 거동 및 운송 CSM

거동, 운송 등의 오염물질의 경로 정보에 초점을 맞춰 구축하는 거동 및 운송 부지개념모델은 다양한 형식 중에서 흐름도로 표현하는 것이 용이하였다. 오염물질의 거동 및 상변화, 지중환경 내 지질 매체에서의 상호작용을 반영한 오염 양상 변화 및 흐름을 표현할 수 있었다.

3.3. 생태 노출경로 CSM

생태에 노출될 수 있는 경로에 대한 정보에 맞춰 구축하는 생태 노출경로 부지개념모델 역시 다양한 형식 중 흐름도로 표현하는 것이 적합하였다. 1차적 오염원으로부터 잠재적인 유출 기작으로 인해 발생될 수 있는 잠재적 2차 오염원, 또한 잠재적 유출 기작으로 인해 어떤 노출 경로를 통해 수용체에게 도달할 수 있는지를 순서에 따라 표현하는 데에 효율적이었다.

3.4. 다이어그램 CSM

종합적인 부지 정보에 중점을 두는 부지개념모델의 경우, 다이어그램과 서술의 형식으로 부지개념모델을 표현하는 것이 적절하였다. 다이어그램 부지개념모델은 그림 형식에 가깝게 오염원, 거동경로, 수용체 관련 요소들을 하나의 다이어그램 안에 종합적으로 표현할 수 있었다.

Fig. 3의 (a)는 기존 전주산업단지 실태조사 보고서 내 제시된 다이어그램 형식의 부지개념모델 이다(K-eco, 2018). 실태조사 결과를 토대로 조사 지역의 지하수 오염 분포현황, 지층분포, 지하수개발 및 이용시설, 신규 관측 정 분포 등을 고려하여 대상 지역 내 지하수 오염 개념 모델을 추정하여 작성한 바 있었다. 주어진 부지개념모델은 종합적인 부지 정보를 다이어그램의 형식으로 구축되었으며 부지개념모델의 핵심적인 구성요소 중 오염원과

거동경로를 조사결과에 기반하여 묘사되어 있다고 볼 수 있다. 하지만 수용체라는 부지개념모델의 구성요소에 있어서는 해당 부지개념모델을 통해 간접적으로만 유추할 수 있다. 부지개념모델을 통해 국내 지중환경오염 관리를 비롯한 위해성 평가 수준을 향상시키기 위해서는 수용체에 대한 정보 및 해석을 바탕으로 한 직접적인 묘사가 필요하다. 또한 해당 부지개념모델의 경우 부지개념모델의 목적 및 구축절차가 고려되지 않고 단순히 조사 지역의 지하수 오염상황을 파악하고 추정하기 위해 조사결과를 요약하는 방식으로 제시된 것으로 보인다. 하지만 사전 부지개념모델에 그치지 않고 조사단계에 따라 부지개념모델을 개선하기 위해서는 보다 체계적으로 구축절차에 따라 부지개념모델이 제시될 필요가 있다. 이러한 개선 사항을 반영할 수 있는 다이어그램 개념모델의 예시는 Groundhog software (BGS, 2021)를 통해 구축하였으며, 이는 Fig. 3의 (b)에서 제시하였다.

3.5. 서술적 CSM

다이어그램 부지개념모델처럼 종합적인 부지 정보에 중점을 두는 서술적 부지개념모델은 그 당시 이해되는 부지에 대한 요약 방식으로 구축한다. 일반적으로 조사 지역, 지질학적 및 수리지질학적 특성, 오염지역, 오염의 종류와 범위 및 인간 건강 위해성/생태계 위해성의 주제를 다루어 작성한다(DTSC, 2008). 전주 산업단지를 예로 하였을 때, 조사 지역에 대하여는 위치 및 범위, 토지이용정보, 지하수 이용시설, 주거용 건물, 지하수 심도 및 흐름 특성 등에 대한 정보를 서술하였다. 지질학적, 수리지질학적 특성으로는 암상, 투수계수 등의 정보를, 오염지역에 대해서는 오염 유출 지점, 오염원, 경로, 민감한 수용체, 오염에 영향받는 매체, 시설 및 우선적 경로 등의 정보를 기입하

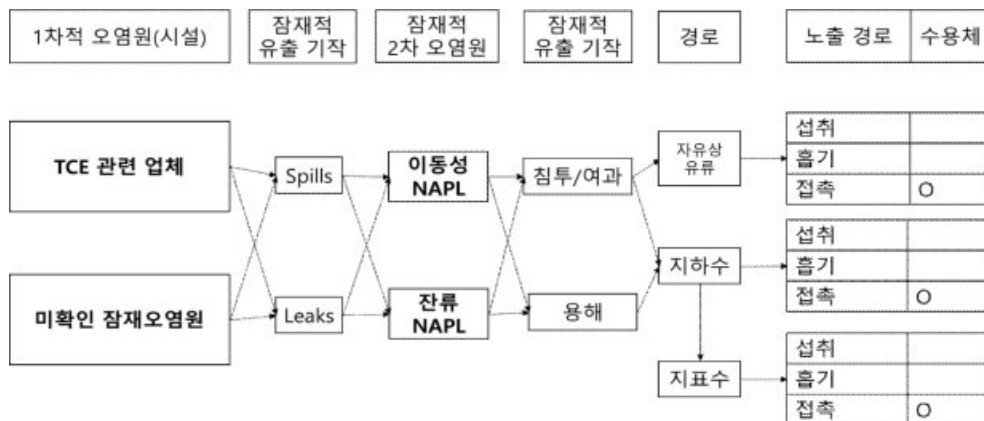
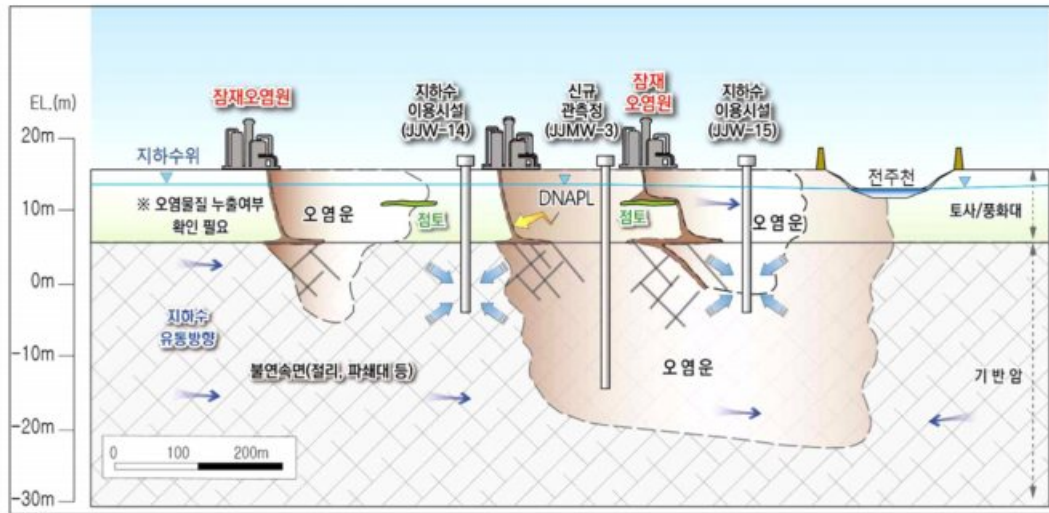


Fig. 2. Ecological exposure pathway conceptual site model of Jeonju site.

(a)



(b)

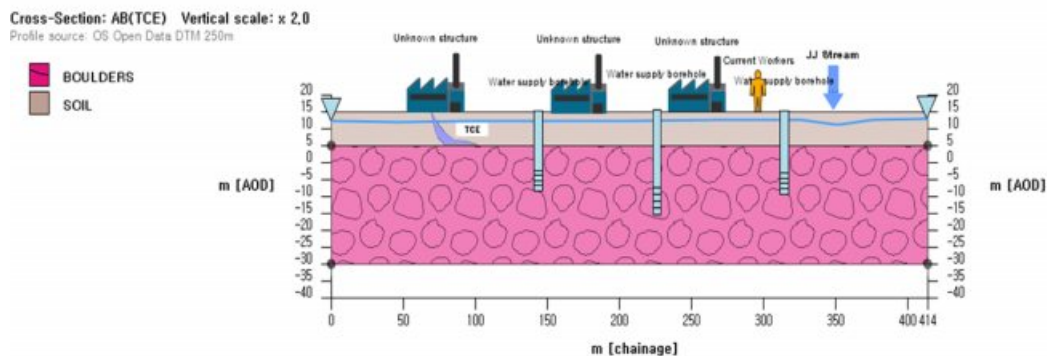


Fig. 3. Diagram conceptual site models of Jeonju site (a) reported by K-eco (2018), and (b) constructed using Groundhog software (BGS, 2021).

였다. 오염의 종류와 범위에서는 오염물질 종류 및 오염 범위와 관련된 측정 결과 등을 제시하였으며 인간의 건강 및 생태계 위해성에서는 보고서 내 언급 사항이 없어 생략하였다.

4. 사전 부지개념모델 검토

부지개념모델을 구축한 후에는, 해당 부지개념모델 수준에서 요구되는 필수 요소들이 충분한 해상도로 조사되었는지의 여부를 근거로 데이터 격차(Data Gap) 해석을 수행할 수 있다. 데이터 격차 해석은 부지개념모델의 검토를 위해 활용될 수 있으며, 이는 부지관리 단계별로 시행되는 조사목적에 근거하여 판단되어야 한다. 국내에서

수행되는 토양 및 지하수 조사단계는 실태조사와 정밀조사(기초조사, 개황조사, 상세조사)로 나눌 수 있다. 조사단계에 따라 조사의 목적 및 항목들이 달라지며, 각 요소별로 조사결과에서 요구되는 불확실성 및 해상도도 달라지게 된다. Table 5에는 단계별 부지 조사의 목적, CSM과 profile별로 요구되는 불확실성 수준을 제안하였다. 각 정보에 대한 불확실성 수준은 확인되지 않은 경우, 추정 가능한 경우, 일부 확인되는 경우, 확인되는 경우, 정밀적인 확인이 가능한 경우로 세분화하여 제시하였다. 실태조사의 경우 조사목적은 오염 발생 여부 및 오염 개연성을 확인하는 것이며 이를 위해 2.1절의 5가지 profile들 중에서 시설 및 부지 정보(Facility), 부지 특성(Physical), 오염 유출/확산(Release) profile에 해당하는 조사결과를 요

Table 4. Narrative conceptual site model of Jeonju site

■ 조사 지역 설명

2018년 지하수 오염 우려지역 실태조사 보고서에 의하면, 조사는 전주 제1,2일반산업단지를 중심으로 한 반경 2 km 지역을 대상으로 진행되었다.

조사 지역은 주로 공업지역과 교통시설지역으로 이루어져 녹지공간은 전혀 분포하지 않는다는 특징이 있다. 북쪽 근접지에는 농경지, 동쪽에는 호남고속도로의 전주 IC와 주거지, 남쪽에는 황방상과 주거지, 서쪽에는 주거지가 분포해 있다. 조사 지역의 지하시설로 지하수 이용 시설(공업, 생활, 농업용)이 있으며 굴착심도는 50%가 50 m 이하, 34%는 50-100 m, 11%는 100-200 m, 4%는 200 m 이상이고 실질적으로 음용을 위한 지하수 시설은 없다.

조사 지역의 지하수 심도는 해수면 기준으로 10-15 m 범위에 형성되어 있고 지하수는 지형 경사를 따라 황방산이 위치한 남서쪽에서 전주천 방향으로의 북동쪽으로 향하는 흐름을 보인다. 지하수위 깊이의 유동 경향성은 JJMW-3 관정에서의 1개월 지하수위 측정을 통해 알아 보았으며 12.58~12.82 m 정도의 시간에 따라 미미한 변동을 확인할 수 있었다.

■ 지질학적, 수리지질학적 특성

조사 지역의 암상으로 중생대 백악기 편상화강암이 기반암을 이루며 그 위에 제 4기 충적층이 넓게 피복하고 있다.

관측정들의 순간수위변화시험을 통해 산출된 투수계수는 9.37×10^{-6} ~ 2.64×10^{-4} cm/sec의 범위를 가지며 이들의 기하평균은 1.10×10^{-4} cm/sec이다.

이처럼 주 대수층은 토사 및 풍화대층 구간에 해당하나 모래 및 실트층의 낮은 투수성의 특징을 보인다.

■ 오염 지역

오염 유출 지점으로는 TCE 관련업체와 미확인 잠재오염원 등을 제시할 수 있다.

유출된 오염원은 불포화 토양, 포화대 그리고 암반의 잔류 염화유기용제로 남아있을 가능성이 있으나 자유상 염화유기용제는 확인이 필요하다.

이러한 염화유기용제 오염원은 불포화대에서 자유상으로 침투하거나 포화대 내에서 공극 및 불연속면들을 따라 수직적 유동, 또는 암반층 내 잔류상의 염화유기용제가 지하수내 용해상 오염물질로 운송될 가능성이 있다.

해당 지역에서 오염에 민감한 수용체로 조사 지역 내에 운영되고 있는 농어업용 14공, 생활용 94공, 공업용 42공의 우물들과 이를 사용하는 사람들을 고려할 수 있으며 지표수체인 전주천이 산업단지 반경 2 km 정도에 위치하여 전주천을 이용하는 사람들도 대상이 될 수 있다. 또한 수용체와 관련하여, 산업단지 반경 2 km 이내에 주거지 및 공업지가 대부분을 차지하며 충적층이 발달한 북쪽은 농경지로 활용되고 있고 남동지역에는 호남고속도로의 전주 IC가 위치해 있다는 정보를 참고할 수 있다.

오염에 영향받는 매체에 대해 요약해 볼 때, 토양의 경우 전주 제1,2 산업단지를 대상으로 한 토양지하수 환경조사에서 토양 내 아연, TPH 오염지역이 확인되었으며 TCE, PCE 오염은 미확인된 바가 있었다. 파쇄암반대의 경우 미확인 된 사항이지만 TCE, PCE 오염을 추정할 수 있다. 지하수의 경우 TCE, PCE 항목이 지하수 생활용수 수질기준을 초과하였고 비소가 소량 검출되었으나 수질 기준을 초과하지는 않았다.

조사 지역 내 특정토양오염관리대상시설, 위험물 및 유독물 제조 등의 취급 사업장, 폐수배출시설처럼 토양, 지하수 오염에 유의해야 할 시설들이 분포한다.

■ 오염의 종류와 범위

28지점에서의 지하수 수질 측정 결과 TCE는 1개의 지점에서 0.08 mg/L를, PCE는 2개의 지점에서 0.012-0.02 mg/L의 농도로 생활용수 수질기준(TCE 0.03 mg/L, PCE 0.01 mg/L)을 초과하였으며 소수성 액체의 경우 해당 보고서에서는 아직 확인한 사례가 없었다.

■ 인간 건강 위해성/생태계 위해성

위해성에 대한 부분은 아직 보고서에서 명시된 바가 없었다.

한다. 실태조사의 목적인 오염 발생 여부 및 오염 개연성 확인은 부지개념모델의 구성요소 중 오염원 정보와 관련이 높다고 할 수 있다. 따라서 시설 및 부지 정보(Facility)와 오염 유출/확산(Release) profile에 해당되는 정보 중에서 오염원 관련 정보들은 포함해야 하므로, Table 5에서 일부 확인 수준으로 제안하였다. 부지 특성(Physical) profile은 거동경로 관련 정보들이 해당될 수 있는데, 오염원의 오염물질 종류를 통해 거동특성을 미루어 보아 합리적인 추정이 가능하므로, Table 5에서 추정 수준으로 제안하였다. 예를 들어, 오염원의 오염물질이 TCE 즉, 물보다 밀도가 높은 DNAPL의 종류라는 것을 알았을 때 지중 오염 유출 후, 중력 작용으로 대수층을 거쳐 암반까지의 거동 가능성을 추정할 수 있다. 토지이용과 노출 특성(LandUse&Exposure), 생태 및 문화적 자원(Ecological

and Cultural Resources) profile은 노출 경로 및 수용체 관련 정보들이 해당되므로 실태조사 단계에서는 요구되는 수준이 아니며 이는 Table 5에서 확인 안 됨 수준으로 제안했다.

Table 5의 제안된 체크리스트의 형식으로 구축한 전주 부지의 사전 부지개념모델을 검토해보았으며 이는 Table 6에 나타내었다. 사전 부지개념모델의 profile별 요구수준과 비교하여 부족하다고 판단되는 정보들을 식별하였는데, 이는 데이터 격차라고 할 수 있다. 식별한 데이터 격차를 해소하기 위한 조사방법들을 권장사항(Recommendation)으로 제시하였다. 데이터 격차 해석을 위한 도표의 형식은 SNC-Lavalin(2022)의 형식을 참고하였다(Table 7).

전주부지 사전 부지개념모델의 경우 제시된 TCE 관련 업체도 산업단지 내 TCE, PCE를 다루는 다른 산업시설

Table 5. Required level for each profile of the conceptual site model

조사단계	CSM	Profiles					목적
		Facility	Physical	Release	Landuse & Exposure	Ecological & Cultural	
실태조사	사전 CSM	O	△	O	X	X	오염 발생 여부 및 오염 개연성
기초조사	기초 CSM	●	△	O	△	△	오염물질
정밀조사	개황조사	●	O	●	△	△	오염 범위
상세조사	정밀 CSM	●	●	●	△	△	오염 양, 거동
위해성 평가	인체위해성 CSM	●	●	●	●	△	위해성
위해성 평가	생태위해성 평가	●	●	●	●	●	생태위해성

●: 정밀 확인, ●: 확인, O: 일부 확인, △: 추정, X: 확인 안됨

Table 6. Review of the preliminary conceptual site model for Jeonju site

조사	CSM	Profiles					목적
		Facility	Physical	Release	Landuse & Exposure	Ecological & Cultural	
전주산업단지 실태조사	사전 CSM	△	O	O	O	X	오염 발생 여부 및 오염 개연성

●: 정밀 확인, ●: 확인, O: 일부 확인, △: 추정, X: 확인 안됨

Table 7. Data Gap analysis of preliminary conceptual site model for Jeonju site

#	Profiles	Data Gaps	Recommendations
1	Physical	불분명한 오염 유출 위치	<ul style="list-style-type: none"> 실태조사에서 파악된 지하수 오염지점을 기준으로 지하수 샘플링 지점을 늘린다. MODFLOW, MT3DMS 등의 지하수 모델링 프로그램을 활용하여 추가적으로 필요한 지하수 샘플링 위치 결정에 고려한다. 실태조사에서 제시한 관정들을 대상으로 지속적인 모니터링을 한다. TCE/PCE 취급 등록시설과 TCE/PCE 배출이력 있는 업체 등 추정 오염시설을 대상으로 추가적인 지하수 조사를 실시한다.

이 없기에 가능성으로 제시된 사항이며 지하수 샘플 위치 및 지하수 흐름 방향을 고려했을 때, 확인되지 않은 상류 지역에 위치하는 잠재오염원에서 오염물질이 누출된 후 지하 심부로 이동·확산 과정에서 지하수 오염이 발생한 것으로 추정된다. 시설 및 부지 정보(Facility) profile를 통해 유출 위치라는 오염원 정보가 일부 확인되어야 하는데 추정의 수준으로 그쳤으며 이는 데이터 격차로 식별되어 Table 7을 통해 데이터 격차로 제안하였다. 부지 특성(Physical) profile은 문헌 조사를 통해 일부 확인된 바가 있어 요구수준을 충족할 수 있었다. 또한 오염 유출/확산(Release Profiles)에 해당되는 정보 중, 지하수 관정에서 검출된 TCE, PCE로 인해 용해성 염화유기용제 성분이

물에 용해된 것을 관측하여 포화대 토양 및 암반의 잔류 NAPL 오염원을 간접적으로 일부 확인할 수 있었으므로, 실태조사의 요구수준에서는 오염 유출/확산(Release Profiles)에 해당되는 정보도 충족하였다고 제안할 수 있었다.

5. 결 론

2차 토양보전기본계획에 따라 지중환경 오염 관리제도의 변화가 진행될 것으로 예상된다. 이 과정에서 지하수와 토양의 통합관리가 시행되고, 부지 단위의 지중환경오염관리가 진행될 것으로 예상되며, 부지관리 과정에서 의사결정을 지원하기 위한 다양한 도구들이 개발될 필요가

있다. 부지 단위 오염관리의 국내 도입에 따른 효용성을 예상하기 위해서는, 핵심 도구인 부지개념모델에 대한 이해와 효용성에 대한 평가가 필요하다. 이에 따라 본 연구에서는 현재 해외에서 부지관리를 위한 의사결정 도구로 개발되어 사용하고 있는 부지개념모델의 개념 및 작성방법에 기반하여 국내 지중환경 오염부지에 대한 부지개념 모델을 구축하였다. 이에 대한 첫 사례로 지하수 오염 우려지역 실태조사가 수행된 전주 산업단지의 실태조사 보고서를 기반으로 사전 부지개념모델 작성하여, 다양한 내용과 형식의 부지개념모델 작성사례를 확보하였다. 실태조사 기반의 사전 부지개념모델은 일부 확인된 시설 및 부지 정보(Facility)와 오염 유출/확산(Release) profiles, 추정된 부지 특성(Physical) profile에 근거한 요약물 통해 오염 발생 여부 및 오염 개연성 확인을 목적으로 한다. 일반적인 실태조사 단계에서 사전 부지개념모델 작성을 위해 요구되는 profile 항목 및 해상도를 고려하여 본 연구에서 구축한 사전 부지개념모델의 데이터 격차를 해석하였다. 사전 부지개념모델의 작성을 통해 효율적으로 실태조사 단계의 부지 현황을 파악할 수 있을 것이며, 사전 부지개념모델의 검토 과정으로 확인된 데이터 격차는 후속 조사 계획에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지중환경오염위해관리기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다. (ARQ201804052004, 지중환경 오염경로·오염물질 스마트 진단·평가·예측 현장적용 기술 개발)

References

BGS, 2021, BGS Groundhog v2.6, <https://www.bgs.ac.uk/technologies/software/groundhog/> (Mar, 18th 2022).

DTSC, 2008, APPENDIX A1 CONCEPTUAL SITE MODEL, Department of Toxic Substances Control California Environmental Protection Agency (https://dtsc.ca.gov/wp-content/uploads/sites/31/2018/11/PT-R_Metals_Main_Text_0808-2.pdf).

ITRC, 2018, TPH Risk Evaluation at Petroleum-Contaminated Sites, The Interstate Technology and Regulatory Council, <https://tphrisk-1.itrcweb.org/5-conceptual-site-models-and-investigative-strategies/> (Jun, 24th 2021).

2018 Final Report on the Survey of Areas Concerned about Groundwater Pollution (Deokjin-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do)

NTEPA, 2013, GUIDELINES ON CONCEPTUAL SITE MODELS, Northern Territory Environment Protection Authority (https://ntepa.nt.gov.au/_data/assets/pdf_file/0007/904327/draft_guidelines_conceptual_site_models.pdf).

SNC-Lavalin, 2022, Preliminary Conceptual Site Models of Potential Contamination (https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/air-land-water/water/flood-response-and-the-environment/water-quality/preliminary_conceptual_site_models_of_potential_contamination.pdf).

USACE, 2012, CONCEPTUAL SITE MODELS, US Army Corps of Engineers, EM 200-1-12 (https://www.publications.usace.army.mil/portals/76/publications/engineermanuals/em_200-1-12.pdf).

USEPA, 2011, Environmental cleanup best management practices: effective use of the project life cycle conceptual site model, US Environmental Protection Agency, EPA 542-F-11-011 (<https://clu-in.org/download/techdrct/csm-life-cycle-fact-sheet-final.pdf>).