

유류오염부지 정밀조사에 기반한 부지개념모델 구축 및 개선

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

¹스마트 지중환경 관리 기술 연구단

²고려대학교 지구환경과학과

Construction and Refinement of Conceptual Site Model Based on Scrutiny of Oil Contaminated Site

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

¹SMART-SEM (Subsurface Environment Management) Research Center

²Department of Earth and Environmental Sciences, Korea University

ABSTRACT

Conceptual site model (CSM) development and enhancement for contaminated sites assists in identifying data gaps during the site investigation process. In this study, CSM was developed and enhanced for a contaminated site in Korea as a case study. Site Y was scrutinized four times previously. The site profiles for each scrutiny were reorganized based on the scrutiny reports, and the relevant data was utilized to develop and enhance CSMs. CSM for the first investigation was developed in various forms including table, flowchart, diagram, and narrative formats. CSM was enhanced in a stepwise manner by incorporating the updated profile information obtained in next investigation to existing CSM. The hypothetical data gap analysis between each investigation step was established to meet the purpose of the follow-up investigation. This case study showed that CSM is a useful tool to identify the history and current status of contaminated sites and thereby help in planning supplementary investigations for better site characterization.

Key words : Oil contaminated site, Conceptual site model, Profile, Refinement, Scrutiny, Data gap analysis

1. 서 론

오염부지의 관리는 장기간 다양한 단계에 걸쳐 수행된다. 일부 오염이 지속되고 있는 부지에서는 오염 상황을 구체적으로 파악하고 정화 계획 등을 수립하기 위한 정밀 조사가 반복적으로 시행되기도 한다. 조사과정에서 수집된 자료를 기반으로 효율적인 부지 관리 전략을 수립하기 위해서 기존 조사자료가 중요해졌으며, 오염토양부지 정보관리체계 효율화에 따른 자료 관리가 요구된다(Hwang

and Lee, 2004). 기존 연구에서 부지 조사자료의 효율적 관리를 위한 도구로서 부지개념모델을 제시한 바 있다 (Bae et al., 2022).

부지개념모델(Conceptual Site Model, 이하 CSM)은 부지의 오염원-경로-수용체에 대한 실제/잠재적 물리적, 화학적, 생물학적 과정을 글, 그림 등으로 표현한 것을 말한다. 부지개념모델은 오염부지 관리 단계를 따라서 개선된다. 오염부지 특성, 오염 상태, 수용체로의 노출 경로, 환경적 위해성 등에 대한 추가적인 조사가 이루어진 경우, 이를 의사결정 과정에 반영하기 위해서 부지개념모델 개선이 수행된다. 단계별 부지개념모델은 오염원-경로-수용체 표 CSM; 위해성 평가의 절차적 요구조건을 흐름도의 형식으로 정리한 위해성평가용 흐름도 CSM; 부지 조사 결과에 대해 요약하고 데이터 격차 또는 불확실성에 대한 논의가 포함될 수 있는 서술적 CSM 등으로 작성될 수 있다. 부지개념모델이 개선됨에 따라 각 항목의 내용이 대

주저자: 배민서, 석사

공저자: 김민경, 박사과정; 김주희, 박사과정; 권만재, 교수; 조호영, 교수

*교신저자: 이순재, 교수

Email: soonjam@korea.ac.kr

Received : 2023. 02. 25 Reviewed : 2023. 03. 13

Accepted : 2023. 04. 10 Discussion until : 2023. 06. 30

제 및 추가되는 방식으로 동일한 형식의 부지개념모델 상에서 조사 단계별 보완 사항을 반영할 수 있다.

오염관리 단계별 목적에 따라 부지개념모델 작성 및 적용 목적이 다르게 제시될 수 있다(NJDEP, 2019; USEPA, 2011). 부지 정밀조사 및 정화 계획 수립 단계에서 부지개념모델은 부지의 지질학적, 생지구화학적 조건을 특성화하고, 오염에 영향을 미치는 부지 이력, 오염물질의 거동 과정 묘사 등의 정보를 주요하게 포함할 수 있게 작성 및 활용된다(NJDEP, 2019). 초기 오염 확인 및 실태조사 단계에서 작성된 부지개념모델은 조사자료에 기반하여 항목별 불확실성을 추가된 자료로 보완하는 방식으로 부지개념모델을 개선한다(Kim et al., 2022; Utom et al., 2019). 오염부지 관리 단계에 있는 Y부지에서는 2012년부터 2020년까지 8년 동안 오염 확인 및 정화 계획 수립을 위한 부지 조사가 네 차례 시행되었다. 유류로 오염된 Y부지에 대한 오염 개연성 확인부터 오염 확산 범위 확인, 정화설계를 위한 목적에 따라 자료가 수집되었다. 본 연구에서는 토양오염정밀조사 보고서를 기반으로 조사 단계별 부지개념모델을 작성 및 개선하여 축적된 자료의 요약 및 효율적인 활용 사례를 제시하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. Y부지 토양정밀조사 보고서

연구부지는 경상북도에 위치한 Y부지로 1960년부터 주한미군기지로 사용되었으며, 유류 저장 및 운반을 위한 송유관이 존재했던 곳이다. 주요 오염개연성 시설은 지상유류저장탱크(AST) 2기와 지하유류탱크(UST) 6기, 대용량 지하유류탱크(UST) 7기 그리고 송유관 시설이 있다. 현재 위 저장탱크와 배관으로부터 누수, 노출된 LNAPL로 인해 토양 및 지하수가 오염되었으며, 최근 2020년에 정화설계를 위한 추가오염조사가 이루어졌으며, 현재 정화 작업이 수행되고 있다.

연구부지 개념모델 구축을 위해 사용된 조사자료는 2012년, 2017년, 2019년 세 차례에 걸친 토양정밀조사 결과와 2020년에 수행된 정화설계를 위한 추가조사 결과가 이용되었다. 2012년, 2017년 토양정밀조사는 조사범위를 넓혀가며 내부에 위치한 오염 개연성 시설물에 대한 토양오염조사를 수행하여 토양오염의 범위 및 오염량 산정 그리고 오염정화 계획을 수립하는 데 목적을 두었다. 2019년에 수행된 토양정밀조사는 추가로 오염개연성이 있을 것으로 추정되는 역사와 송유관시설을 대상으로 조사를 수행하였으며, 2020년의 추가오염조사는 정화설계를

위해 연구부지의 추가조사가 이루어졌다. 따라서 총 네 차례의 오염조사가 이루어졌으며, 오염조사범위는 20,000 m² 에서 약 70,000 m²까지 확장되었고, 수직적 오염분포 조사 또한 상세화되어 수행되었다.

2.2. 부지개념모델 작성 및 개선 방법

부지개념모델의 기본적인 작성 방법은 조사정보 요약 - 경로 분석 - 체크리스트 작성 - 부지개념모델 구축의 순서로 수행된다(Bae et al., 2022). 조사 수행 이후 작성된 부지개념모델의 검토는 데이터갭 해석을 통해 수행된다. 이를 통해 부족한 부지조사 정보를 인지하고 이를 기반으로 후속 조사 계획 수립할 수 있다. 이후 수행된 후속 조사로 정보가 추가되는 경우 이를 반영한 부지개념모델의 개선이 수행될 수 있다. 개선되는 부지개념모델의 작성은 마찬가지로 기본 작성 절차를 따라 수행된다. 본 연구에서는 2012년 1차 정밀 조사 결과를 기반으로 1차 부지개념모델 구축하였다. 이후 2017, 2019, 2020년에 수행된 후속조사 결과들을 반영하여 해당 시점에 개선된 부지개념모델을 작성하였으며, 이를 통해 부지 관리를 위한 의사결정 과정을 복원하였다.

3. 오염부지 조사자료 해석

3.1. 조사자료 요약

2012년, 2017년, 2019년, 2020년에 수행된 오염부지 조사자료를 해석하여 부지개념모델 작성을 위한 요소정보를 추출하였다. 조사 연도에 해당하는 부지개념모델 구축을 위해서 조사별 자료 해석을 별도로 수행하였으며, 이를 통합하여 Supplementary Table 1에 제시하였다.

오염부지의 조사범위는 조사 차수가 증가함에 따라 넓어지며, 토양시료 채취 또한 구역을 나누어 수행하고, 수직적 오염도를 알기 위해 세분화하여 수행함을 확인할 수 있다. 따라서 부지특성은 점점 상세해지고, 지속적으로 보완되는 방향으로 개선되는 것을 확인할 수 있다. 오염원의 경우, 2012년의 오염조사에서는 오염원을 특정할 수 없었으나 2017년 조사에서 반지하저장시설 및 배관 등이 오염원임을 확인하였다. 오염물질 또한 조사 차수에 따라 변화하였는데, 2012년에는 벤젠, 톨루엔, 크실렌, TPH까지 네 가지 항목이었으나 2017년에 토양오염우려기준을 넘는 에틸벤젠과 납이 검출되었다. 이러한 형태의 조사자료 관리는 과거 부지 이력, 현재 부지 현황 파악 및 향후 오염 변화 예측을 통해 오염부지 관리를 위한 통합적 데이터 관리에 유용하게 사용할 수 있다.

Table 1. Checklist for major pathway analysis at various site investigation phases in 2012

유출 위치 — Containment로부터 방류/유출(Spill/Release)되는 석유 기름 <input type="checkbox"/> 제품저장시설 <input type="checkbox"/> 배관/유선 <input type="checkbox"/> 산업 <input type="checkbox"/> 폐기물관리시설 <input type="checkbox"/> 배수로, 저수지 <input checked="" type="checkbox"/> 기타/미확인
<input checked="" type="checkbox"/> 자유상 NAPL 오염원 - 흐를 수 있는 기름(ITRC LNAPL Update Guidance)
<input checked="" type="checkbox"/> 지표 <input type="checkbox"/> 지표에서 기름의 흐름과 pooling
지표유출에 의한 운송(GRAVITY-DRIVEN FLOW) <input type="checkbox"/> 지형에 의한 기름의 수평적 유동 <input checked="" type="checkbox"/> 지표수의 흐름에 의한 기름의 수평적 유동(강우 혹은 계절적 물의 흐름) <input type="checkbox"/> 조석순환 중 기름의 수평적 유동
잠재적 생태 수용체 <input checked="" type="checkbox"/> 육상 식물(허브/풀) <input checked="" type="checkbox"/> 파충류 및 양서류 <input checked="" type="checkbox"/> 육상 무척추동물(지렁이 및 곤충) <input checked="" type="checkbox"/> 야생동물(조류 및 포유류)
불포화대 토양 <input checked="" type="checkbox"/> 기름의 지표와 지하수면 사이의 수직적 유동
GRAVITY-DRIVEN FLOW에 의한 운송 <input checked="" type="checkbox"/> 불포화 토양으로 기름 누출
지하수 포화대 <input checked="" type="checkbox"/> 지하수면에서 기름의 수평적 유동
GROUNDWATER-DRIVEN FLOW에 의한 운송 <input type="checkbox"/> 일시적 수직 변동으로 인한 지하수면 경계면의 기름 번짐 현상(Smearing)과 침수 <input checked="" type="checkbox"/> 지하수면에서 일시적인 수직적 출렁임과 수리경사에 의한 기름의 수평적 유동
<input checked="" type="checkbox"/> 잔류상 NAPL 오염원 - 매체에 갇힌 부동의 NAPL
지표 토양 <input checked="" type="checkbox"/> 토양에 잔류된 NAPL(풍화되고, 농도가 낮을 가능성이 높음)
불포화 토양 <input checked="" type="checkbox"/> 토양 내 잔류 기름(풍화되고, 농도가 낮을 가능성이 높음)

Table 2. Checklist for major pathway analysis at various site investigation phases in 2017, 2019

유출 위치 — Containment로부터 방류/유출(Spill/Release)되는 석유 기름 <input checked="" type="checkbox"/> 제품저장시설 <input checked="" type="checkbox"/> 배관/유선 <input type="checkbox"/> 산업 <input type="checkbox"/> 폐기물관리시설 <input type="checkbox"/> 배수로, 저수지 <input checked="" type="checkbox"/> 기타/미확인
<input checked="" type="checkbox"/> 자유상 NAPL 오염원 - 흐를 수 있는 기름(ITRC LNAPL Update Guidance)
<input checked="" type="checkbox"/> 지표 <input type="checkbox"/> 지표에서 기름의 흐름과 pooling
지표유출에 의한 운송(GRAVITY-DRIVEN FLOW) <input type="checkbox"/> 지형에 의한 기름의 수평적 유동 <input checked="" type="checkbox"/> 지표수의 흐름에 의한 기름의 수평적 유동(강우 혹은 계절적 물의 흐름) <input type="checkbox"/> 조석순환 중 기름의 수평적 유동
잠재적 생태 수용체 <input checked="" type="checkbox"/> 육상 식물(허브/풀) <input checked="" type="checkbox"/> 파충류 및 양서류 <input checked="" type="checkbox"/> 육상 무척추동물(지렁이 및 곤충) <input checked="" type="checkbox"/> 야생동물(조류 및 포유류)
불포화대 토양 <input checked="" type="checkbox"/> 기름의 지표와 지하수면 사이의 수직적 유동
GRAVITY-DRIVEN FLOW에 의한 운송 <input checked="" type="checkbox"/> 불포화 토양으로 기름 누출
지하수 포화대 <input checked="" type="checkbox"/> 지하수면에서 기름의 수평적 유동
GROUNDWATER-DRIVEN FLOW에 의한 운송 <input type="checkbox"/> 일시적 수직 변동으로 인한 지하수면 경계면의 기름 번짐 현상(Smearing)과 침수 <input checked="" type="checkbox"/> 지하수면에서 일시적인 수직적 출렁임과 수리경사에 의한 기름의 수평적 유동
<input checked="" type="checkbox"/> 잔류상 NAPL 오염원 - 매체에 갇힌 부동의 NAPL
지표 토양 <input checked="" type="checkbox"/> 토양에 잔류된 NAPL(풍화되고, 농도가 낮을 가능성이 높음)
불포화 토양 <input checked="" type="checkbox"/> 토양 내 잔류 기름(풍화되고, 농도가 낮을 가능성이 높음)

3.2. 주요 경로 분석

조사연차별 주요 경로는 ITRC의 ‘TPH Risk Evaluation at Petroleum-Contaminated Sites(ITRC, 2018)를 이용하여 확인하였다. 네 차례의 토양오염조사 결과에서 명확히 확인된 경로만을 체크하였고, 해당 조사 시점에 확인된 사항을 기반으로 갱신된 경로는 빨간색 사각형과 밑줄을 표기하여 구분하였다. 2012년의 경우, 오염조사 결과에서 오염우려기준을 초과한 오염이 불포화대 영역과 지하수에서 검출되었으므로, 불포화대 토양과 지하수 포화대를 체크하였다. 위 오염의 영향을 받는 잠재적 생태 수용체는 오염이 발견된 주변에 있을 것으로 간주하여 체크하였다. 2017년에는 오염원이 지하저장탱크와 송유관임이 확인된 점과 청취조사에서 강우가 발생할 때 소하천에

서 기름을 목격한 사실을 토대로 자유상 NAPL이 지표수의 흐름에 의해 수평적 이동함을 확인하였다. 2019년에는 오염원에 선로 및 송유관시설만 추가되었으므로 2017년의 체크리스트는 변동이 없었다. 2020년은 유류의 취기가 심한 곳을 추가 시료 채취를 한 사실이 있으므로 이에 따라 인간 수용체 경로를 새로 고려할 필요성이 대두되었다. Table 1~3은 Profiles 중 체크리스트에 해당하는 자료가 확인된 항목만을 체크하여 주요 오염원, 경로, 수용체 요소 파악을 위해 사용하였다.

4. 부지개념모델 작성 및 개선

연차별 조사자료 요약(Profiles)과 주요 경로 분석을 토

Table 3. Checklist for major pathway analysis at various site investigation phases in 2020

유출 위치 — Containment로부터 방류/유출(Spill/Release)되는 석유 기름 <input checked="" type="checkbox"/> 제품저장시설 <input checked="" type="checkbox"/> 배관/유선 <input type="checkbox"/> 산업 <input type="checkbox"/> 폐기물관리시설 <input type="checkbox"/> 배수로, 저수지 <input checked="" type="checkbox"/> 기타/미확인	
<input checked="" type="checkbox"/> 자유상 NAPL 오염원 - 흐름 수 있는 기름(ITRC LNAPL Update Guidance)	
<input checked="" type="checkbox"/> 지표 <input type="checkbox"/> 지표에서 기름의 흐름과 pooling	
	지표유출에 의한 운송(GRAVITY-DRIVEN FLOW) <input type="checkbox"/> 지형에 의한 기름의 수평적 유동 <input checked="" type="checkbox"/> 지표수의 흐름에 의한 기름의 수평적 유동(강우 혹은 계절적 물의 흐름) <input type="checkbox"/> 조석순환 중 기름의 수평적 유동
	잠재적 생태 수용체 <input checked="" type="checkbox"/> 육상 식물(허브/풀) <input checked="" type="checkbox"/> 파충류 및 양서류 <input checked="" type="checkbox"/> 육상 무척추동물(지렁이 및 곤충) <input checked="" type="checkbox"/> 야생동물(조류 및 포유류)
불포화대 토양 <input checked="" type="checkbox"/> 기름의 지표와 지하수면 사이의 수직적 유동	
	GRAVITY-DRIVEN FLOW에 의한 운송 <input checked="" type="checkbox"/> 불포화 토양으로 기름 누출
지하수 포화대 <input checked="" type="checkbox"/> 지하수면에서 기름의 수평적 유동	
	GROUNDWATER-DRIVEN FLOW에 의한 운송 <input checked="" type="checkbox"/> 일시적 수직 변동으로 인한 지하수면 경계면의 기름 번짐 현상(Smearing)과 침수 <input checked="" type="checkbox"/> 지하수면에서 일시적인 수직적 출렁임과 수리경사에 의한 기름의 수평적 유동
<input checked="" type="checkbox"/> 잔류상 NAPL 오염원 - 매체에 갇힌 부동의 NAPL	
지표 토양 <input checked="" type="checkbox"/> 토양에 잔류된 NAPL(풍화되고, 농도가 낮을 가능성이 높음)	
	인간 수용체 경로 <input checked="" type="checkbox"/> 앞은 토양의 잔류 기름에 대한 접촉, 우발적 섭취 및 흡입 노출 <input type="checkbox"/> 농작물—뿌리 채소의 섭취
불포화 토양 <input checked="" type="checkbox"/> 토양 내 잔류 기름(풍화되고, 농도가 낮을 가능성이 높음)	
	휘발에 의한 운송 <input checked="" type="checkbox"/> 영향을 받은 지하 토양으로부터 증기 발생
	인간 수용체 경로 <input checked="" type="checkbox"/> 증기를 통한 섭취 노출

대로 작성한 부지개념모델 작성과 검토 및 개선 과정을 제시하였다. 부지개념모델을 구성하는 정보는 주요 경로 분석용 체크리스트에서 확인된 항목을 반영한 것이다. 미확인 항목은 해당 조사 단계에서의 데이터갭을 해석하는데 직접적으로 활용할 수 있으며, 후속 조사를 통해 보완 개선될 수 있다. 부지개념모델은 목적과 형식에 따라 ‘오염원-경로-수용체 표 CSM(Table 4, 7, 10, 13),’ ‘위해성 평가용 흐름도 CSM(Fig. 1, 3, 5, 7),’ ‘오염거동 다이어그램 CSM(Fig. 2, 4, 6, 8),’ ‘서술식 CSM(Table 5, 8, 11, 14)’으로 구분하였다. 오염원-경로-수용체 표 CSM은 체크리스트에서 확인된 항목이 부지개념모델 구성 요소 중 어느 항목을 구성하고 있는지 명확하게 파악하는 데에 효율적이다. 위해성 평가용 흐름도 CSM은 수용체에 미치

는 위해성을 평가하기 위해 이전에 수행되어야 하는 시나리오별 용량/반응 평가, 노출 평가용 오염 및 노출 정보를 순차적으로 반영하기에 유용한 형태의 부지개념모델이다. 오염거동 다이어그램 CSM은 오염이 지중환경 및 노출 환경을 따라 확산되는 과정을 파악하기에 적합한 부지개념모델이다. 오염 유출 지점으로부터 지중환경을 오염시킨 오염의 상태, 위치, 거동 기작을 육지의 대수층과 하천/바다의 단면도 상에 표현하였다. 가장 통합적이고 구체적인 정보까지 포함할 수 있는 서술식 CSM은 다른 종류의 CSM에서 표현하기 어려운 불확실성/민감도 분석까지 포함하여 의사결정을 지원할 수 있는 부지개념모델이다. 이와 같이 제시된 종류의 부지개념모델이 아니더라도 부지개념모델의 구성 요소를 모두 포함하고 있다면, 필요에 따

Table 4. Table CSM for source-pathway-receptor identification at 2012

오염원		경로		수용체		
시설	상태	위치	지중 경로	노출경로	잠재적 생태 수용체	인간
미확인	이동상 NAPL	지표	- NAPL의 지표와 지하수면 사이의 수직적 유동 - 중력배수에 의한 운송: 불포화토양으로 기름 누출	미확인	- 육상 식물(허브/풀) - 파충류 및 양서류 - 육상 무척추동물 (지렁이 및 곤충) - 야생동물 (조류 및 포유류)	미확인
		불포화대	- 지하수면에서 NAPL의 수평적 유동 - 중력배수에 의한 운송: 지하수면에서 일시적인 수직적 출렁임과 수리경사에 의한 NAPL의 수평적 유동			
		포화대	- 토양에 잔류된 NAPL로 경로 없음			
	지표	- 토양 내 잔류 NAPL로 경로 없음				
잔류상 NAPL	불포화대	지표	- NAPL의 지표와 지하수면 사이의 수직적 유동 - 중력배수에 의한 운송: 불포화토양으로 기름 누출			

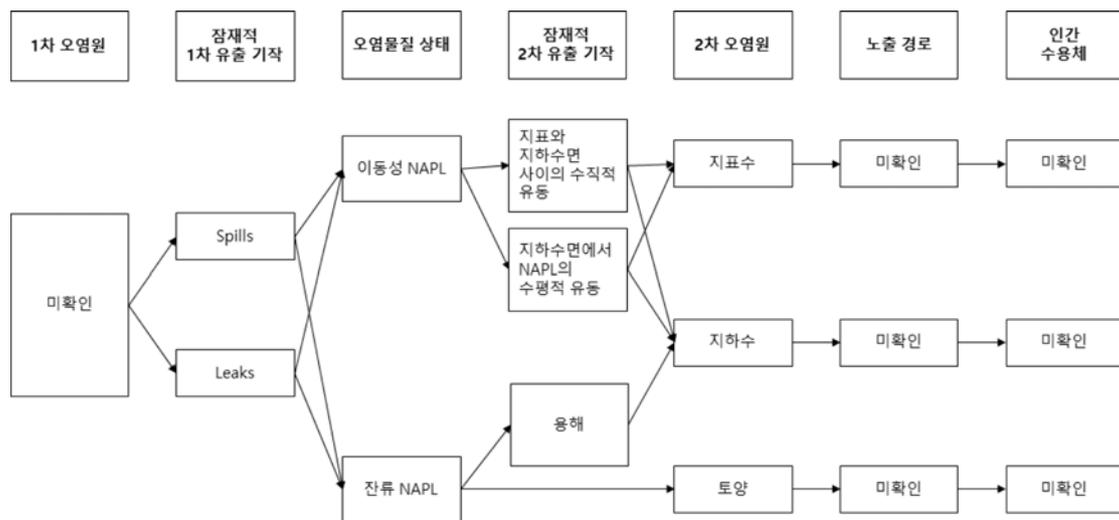


Fig. 1. Flowchart CSM for describing contaminant pathways at 2012.

라 목적을 효율적으로 표현할 수 있는 형식의 부지개념모델 종류를 채택할 수 있다.

4.1. 1차 정밀부지개념모델(2012)

오염 개연성이 확인된 이후 정밀한 조사가 처음 이루어진 시점에서, 조사 이전까지 부지에 대해서 알려진 정보

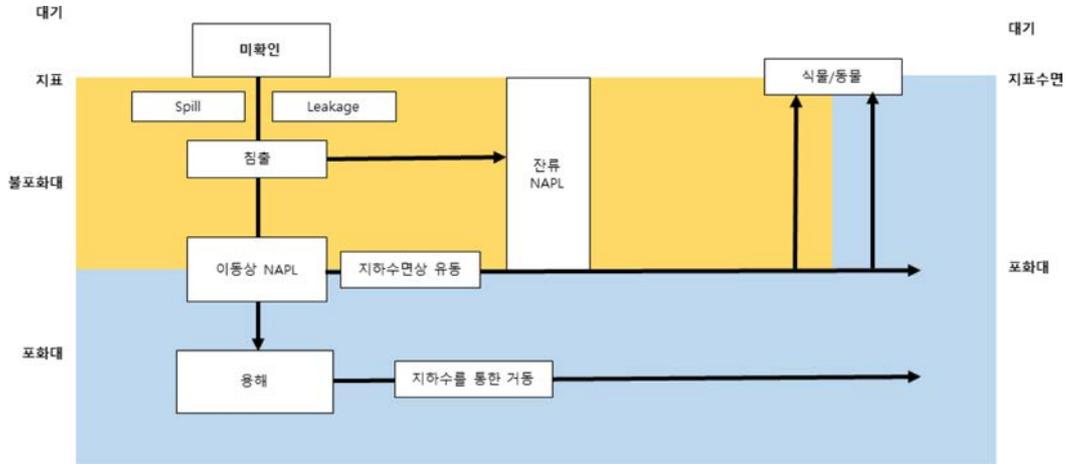


Fig. 2. Diagrammatic CSM for describing processes of contaminant fate and transport at 2012.

Table 5. Narrative CSM at 2012

<p>■ 연구부지 설명</p> <ul style="list-style-type: none"> • AST, UST, 펌프실, 지하 및 지상연결배관 등이 존재하여 유류오염 가능성이 있는 지역으로 면적은 20,475 m² • 내부 부지 이력은 1970년 12월, 장거리 송유관 준공(포항-서울, 미군), 1981년 1월, 50,000Bbl 탱크 7기 건설 개시(중전 10,000Bbl 철거), 1982년 11월, 50,000Bbl 탱크 7기 중 3기 건설완료(TANK 및 지상배관 지하화), 1984년 12월, 50,000Bbl 탱크 4기 추가 건설완료(TANK 및 지상배관 지하화), 1992년 6월 13일, TKP 저장소 및 송유관 시설 주한미군 → 국방부(육군)로 이관(이관과 동시 SK(주)(구 대한석유공사) 위탁관리), 1999년 10월, 대한송유관공사 위탁관리.
<p>■ 지질학적, 수리지질학적 특성</p> <ul style="list-style-type: none"> • 암석/토양의 특성: 사질양토, 양질사토, 식양토 • 관측정 6개에서 수리전도도는 $1.91 \times 10^{-4} \sim 3.83 \times 10^{-4}$ cm/sec(기하평균 2.93×10^{-4} cm/sec)으로 대수층은 전반적으로 투수성이 양호함. • 지하수 흐름은 지형이 높은 남쪽방향의 1구역에서 북쪽방향의 2구역으로 흐름. 2구역의 상부에서 발생한 토양오염은 수두구배 및 농도구배를 따라 2지역 하부(하천방향)으로 확산 및 이동하였을 가능성이 높은 것으로 판단. • 대상 지역에 나타나는 대표적인 지질구조선은 북동-남서 방향의 단층선으로 조사지역 북동부 경계지대를 흐르는 반지천(낙동강으로 유입)과 이언천 상류 그리고 동연천 지류를 따라 분포하고 있어 단층선이 유로 형성에 적지 않은 영향을 준 것으로 판단.
<p>■ 오염 지역</p> <ul style="list-style-type: none"> • 오염유출시설을 AST, UST, 펌프실, 지하 및 지상연결배관 등으로 추정. • 대상지역에 분포하는 지하수의 흐름은 지형이 높은 남쪽방향의 1구역에서 북쪽방향의 2구역으로 흐름. 2구역의 상부에서 발생한 토양오염은 수두구배 및 농도구배를 따라 2지역 하부(하천방향)으로 확산 및 이동하였을 가능성이 높음.
<p>■ 오염의 종류와 범위</p> <ul style="list-style-type: none"> • 오염물질은 TPH와 벤젠, 톨루엔, 크실렌 • 토양오염의 경우, 개황조사에서 토양오염은 전 구역에 걸쳐 확인되며 오염농도 및 오염 깊이는 구역별로 차이를 보임. 정밀조사에서 2구역의 오염은 지표하 0~5 m까지 나타남. 3지역을 초과하는 오염은 주로 공정지역, 물류창고의 AST, 펌프실 주변 배관, 유류 분배지역과 외부로 연결된 송유관로 주변에서 나타남. 3지역 기준을 초과한 대부분의 오염은 지표에서 2 m 이내로 나타났고, 최대 4 m까지 오염이 확인됨. • 1구역의 TPH의 기준초과면적은 1지역 기준으로 40 m², 2지역 기준으로 0 m²으로 미량의 오염 확인. • 2구역의 TPH의 기준초과면적은 3지역 기준으로 4,530 m², 기준초과부피는 5,740 m³이며, 오염물질별 기준초과면적과 기준초과 부피가 계산되어 제시됨. • 지하수 오염의 경우, 지하수 관측정을 7개 설치하고(2012년 9월 19일), 각 관측정에서 시료를 1회 채수하여 TPH, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌, TCE, PCE 항목에 대해 분석, 지하수오염물질은 지하수 생활용수기준을 적용 • TPH 항목만이 3,098.80 mg/kg으로 지하수 생활용수 기준을 초과하고 나머지 항목은 기준 미만.
<p>■ 인간 건강 위해성/생태계 위해성</p> <ul style="list-style-type: none"> • 미확인

를 모두 수집하고 조사를 새롭게 수행한 결과를 요약한 부지개념모델을 작성하였다. 오염원과 경로, 수용체 등이 미확인 상태인 항목이 다수 있으며, 이는 Table 4와 Fig. 1에서 확인할 수 있다. Fig. 2의 경우 토양 및 지하수 오염에서 발생할 수 있는 간단한 경로가 묘사되었으며, Table 5에서 이에 대한 가장 통합적인 요약이 글로 작성되었다.

차 조사 시 보완사항을 Table 6에 제시하였다. 실제 데이터 갭 해석은 1차 조사 이후 수행되어 다음 차수 조사에 반영되는 것이 순서이나, 본 연구에서는 이미 수행된 2차 자료와의 대조를 통해 이루어졌다. 이전 조사 단계에서 부족한 조사정보를 Profile 별로 작성한 후, 이에 대해 2017년 부지개념모델 작성을 위해 조사에서 요구되는 개선 사항을 제시하였다(Dam et al., 2015).

4.2. 1차 부지개념모델의 데이터갭 해석 및 2차조사 시 보완사항

1차 부지개념모델 작성 후 가상적 데이터갭 해석 및 2

4.3. 2차 정밀부지개념모델 작성(2017)

2017년의 부지개념모델에서는 오염원의 오염 유출 시설이 특정되었으며, 환경 조건의 시계열적 변동에 의한 지

Table 6. Probable data gap analysis for CSM at 2012

Profiles	데이터갭	개선 사항
시설 및 정보	• 부지 면적 확장	• 2012년: 20,475 m ² • 2017년: 70,000 m ²
	• 오염 유출 지점의 구체화	• 2012년: 오염 유출 가능 지점 제시: AST, UST, 펌프실, 지하 및 지상연결배관 등 • 2017년: 오염이 확인된 유출 지점 명시(일반지역, 반지하저장시설, 탱크주변 배관)
	• 외부 부지이력 추가	• 2017년: 외부 부지이력 추가
부지특성	• 지하수위 조사자료 추가	• 2017년: 6개 관측정에서 관측정 상부로부터 지하수위까지의 깊이 총 2회 측정된 자료 추가
오염유출 / 확산	• 토양오염 조사 지점/범위 확대	• 2012년: 두 개의 구역(1, 2 구역)으로 구분하여 조사 • 2017년: 부지 전범위에 대한 통합적 조사, 반지하저장탱크(TS) 7기 포함하여 조사
	• 지하수오염 재조사자료 추가	조사 관측정 변경(축소) • 2012년: 7개 관측정 • 2017년: 6개 관측정
토지이용과 노출특성	• 토지 이용 정보 추가	• 2017년: 이중 집중지(34.62%), 답(7.69%), 도로용지(9.62%)와 유지, 임야, 전, 구거 등으로 구분
생태 및 문화적 자원	-	-

Table 7. Table CSM for source-pathway-receptor identification at 2017

오염원		경로			수용체	
시설	상태	위치	지중 경로	노출경로	잠재적 생태 수용체	인간
<일반지역(FS)> - 철도시설 - 송유통제관실 - 미군세차장 - 유수분리조	이동상 NAPL	지표	- 지표수의 흐름에 의한 NAPL의 수평적 이동: 강우 또는 계절적 물의 흐름	미확인	- 육상 식물 (허브/풀) - 파충류 및 양서류 - 육상 무척추동물 (지렁이 및 곤충) - 야생동물 (조류 및 포유류)	미확인
		불포화대	- NAPL의 지표와 지하수면 사이의 수직적 이동 - 중력배수에 의한 운송: 비포화토양으로 기류 누출			
		포화대	- 지하수면에서 NAPL의 수평적 이동 - 중력배수에 의한 운송: 지하수면에서 일시적인 수직적 출렁임과 수리경사에 의한 NAPL의 수평적 이동			
<유류 저장소> - 반지하 저장시설(TS)	잔류상 NAPL	지표	- 토양에 잔류된 NAPL로 경로 없음			
		불포화대	- 토양 내 잔류 NAPL로 경로 없음			
<유류 이송시설> - 지하 및 지상연결배관						

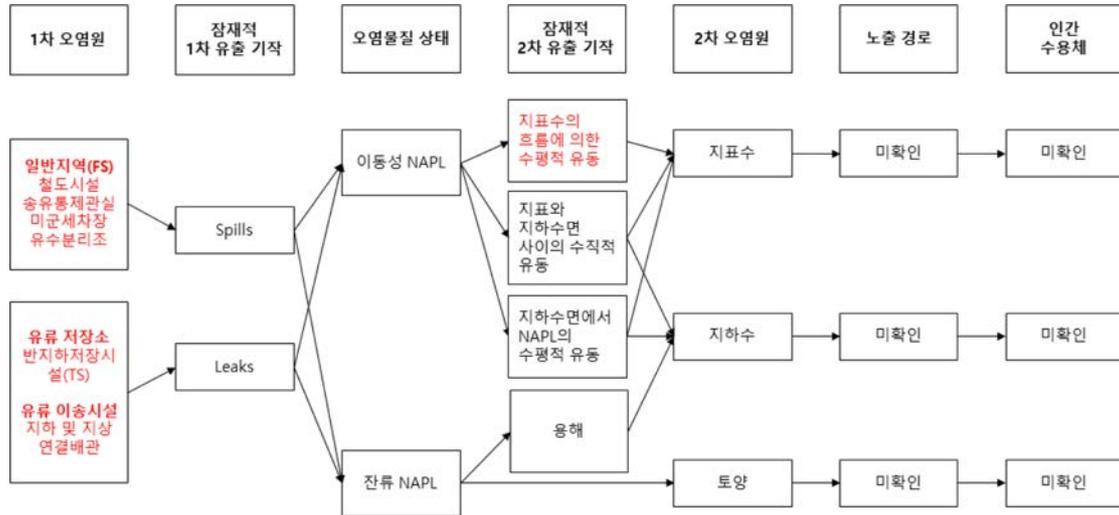


Fig. 3. Flowchart CSM for describing contaminant pathways at 2017.

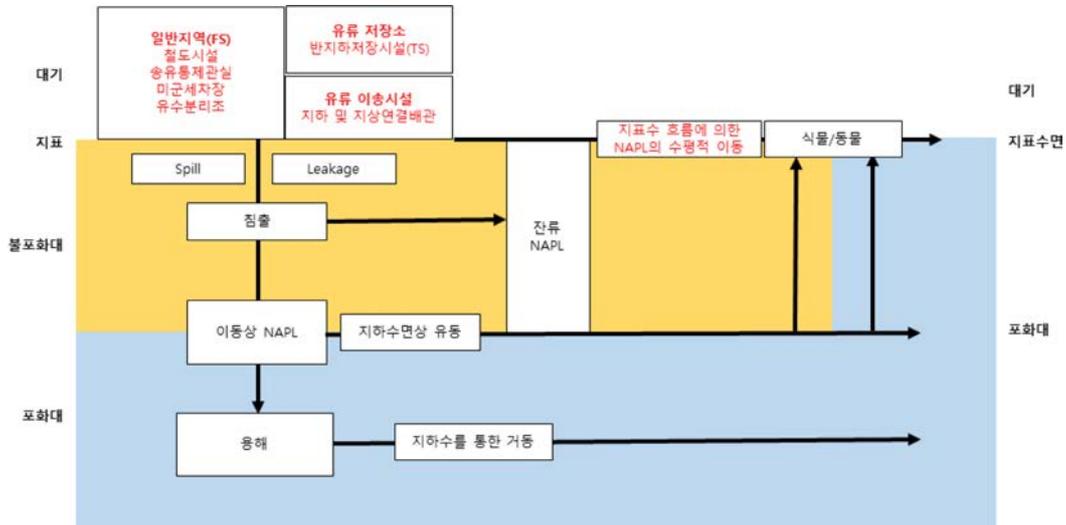


Fig. 4. Diagrammatic CSM for describing processes of contaminant fate and transport at 2017.

중 경로가 주요하게 추가되었다. 이에 따른 변경 항목을 Table 7에서 확인할 수 있으며, Fig. 3과 Fig. 4에서 경로 내 변화를 반영하고, Table 8에서는 통합적인 부지개념모델 개선 사항이 작성되었다. Table 7, 8의 주요 업데이트 사항은 밑줄로 표시하였다.

4.4. 2차 부지개념모델의 데이터갭 해석 및 3차조사 시 보완사항

2017년에는 부지 범위가 확대되고 보다 정밀해진 조사 결과가 이전 결과를 대체하여 부지개념모델에 반영되었다. Y역 철도시설과 관련한 오염이 심각한 것으로 추정되는 점을 고려하여 주요 개선 사항으로 Y역 부근 부지 조사

정보를 설정함으로써, 데이터갭 해석을 통한 개선 사항 제안에 활용되었다(Table 9).

4.5. 3차 정밀부지개념모델 작성(2019)

Y역 근처 철도시설 부근 범위에 대한 오염조사가 추가로 이루어졌으며 조사결과는 Table 10, 11과 Fig. 5, 6과 같이 추가되었다.

4.6. 3차 정밀부지개념모델의 데이터갭 해석 및 4차조사 시 보완사항

지반특성을 파악을 위해 시추자료를 확인하였으나, 얇은 시추심도와 적은 시추 수로 인한 정보의 부족으로 심

Table 8. Narrative CSM at 2017

<p>■ 연구부지 설명</p> <ul style="list-style-type: none"> • 00저유소 및 인접지역, 대상 부지면적 70,000 m²(약 2만 1천평), 2012년도 조사 시 부지보다 범위가 확대됨. • 내부 부지 이력으로, 00저유소는 과거 미군이 사용하던 시설로서 1960년대부터 1992년까지 주한미군에서 직접 운영함. 반 지상화 저장탱크 7기를 제외한 일부 건물에 보일러를 설치하고, 일반 지하저장탱크로부터 유류를 공급받아 사용함. • 외부 부지 이력에는 00저유소 경계와 접하여 현재 운영 중인 Y역 철로(경원선 3, 4라인)가 존재하고 Y역 북동쪽으로는 민가 및 도로가 인접함. 주변 지역은 국유지 및 개인 필지로 특별한 오염개연성시설의 설치 사실은 확인이 되지 않음. 과거부터 지금까지 건물 위치 변동은 없으며, 일부 창고(1995년도)만 신설됨. 청취조사 중 조사대상 지역이 미군에 의해 관리되고 있던 시기에 우천 시 오염물질(기름)이 대상 지역에서 주변 소하천으로 흘러들었다는 이야기를 들을 수 있었음. 해당 QC지역 내부와 연결되는 송유관이 존재함. • 부지인접시설에는 00저유소 경계와 접하여 현재 운영 중인 Y역 철로(경원선 3, 4라인)가 있으며, Y역 북동쪽으로는 민가 및 도로가 인접함.
<p>■ 지질학적, 수리지질학적 특성</p> <ul style="list-style-type: none"> • 암석/토양의 특성: 사질양토, 양질사토, 식양토 • 총 2회에 걸쳐 관측정상부에서 지하수위까지의 깊이 측정된 결과 1~4 m 심도를 가짐 • 관측정 6개의 수리전도도는 $6.52 \times 10^{-2} \sim 4.41 \times 10^{-3}$ cm/sec 으로, 평균 2.93×10^{-4} cm/sec 로 산정됨. • 지하수 흐름은 지형이 높은 남쪽방향의 1구역에서 북쪽방향의 2구역으로 흐름. 2구역의 상부에서 발생한 토양오염은 수두구배 및 농도구배를 따라 2지역 하부(하천방향)으로 확산 및 이동하였을 가능성이 높은 것으로 판단함. 대상 지역에 나타나는 대표적인 지질구조선은 북동-남서 방향의 단층선으로 조사지역 북동부 경계지대를 흐르는 반지천(낙동강으로 유입)과 이연천상류 그리고 동연천지류를 따라 분포하고 있어 단층선이 유로 형성에 적지 않은 영향을 준 것으로 판단함.
<p>■ 오염 지역</p> <ul style="list-style-type: none"> • 오염유출시설이 일반지역(FS): 철도시설, 송유통제관실, 미군세차장, 유수부리조; 반지하저장시설(TS): 1, 2, 3, 6번 탱크 오염확인; 탱크 주변 배관(T): 3, 6번 탱크 배관. 오염이 확인된 곳으로 구체화됨. • 대상지역에 분포하는 지하수의 흐름은 지형이 높은 남쪽방향의 1구역에서 북쪽방향의 2구역으로 흐름. 2구역의 상부에서 발생한 토양오염은 수두구배 및 농도구배를 따라 2지역 하부(하천방향)으로 확산 및 이동하였을 가능성이 높음. • 2012년 “한국군 군사시설 및 철도시설 토양정밀조사” 과업의 일부로, 환경부가 보유하고 있는 국가오염부지목록(NCSI) 중 조사우선 순위에 의해 토양정밀조사 대상지로 채택됨.
<p>■ 오염의 종류와 범위</p> <ul style="list-style-type: none"> • 오염물질은 TPH와 벤젠, 톨루엔, 크실렌 • 토양오염의 경우, 일반지역(FS): 오염이 확인된 지점의 최대심도는 E.L. - 42.0 m, 반지하저장시설(TS): 오염이 확인된 지점의 최대심도는 E.L. - 62.0 m, 탱크주변 배관(T): 오염이 확인된 지점의 최대심도는 E.L. - 58.0~57.0 m로 나타남. “3지역” 토양오염우려기준을 초과한 오염면적은 약 10,462.1 m², 오염토량은 약 13,133.3 m³으로 산정됨. “2지역” 토양오염우려기준을 초과한 오염면적은 약 31,511.6 m², 오염 토량은 약 56,284.3 m³으로 산정됨. “1지역” 토양오염우려기준을 초과한 오염면적은 약 40,054.6 m², 오염토량은 약 80,429.4 m³으로 산정됨. • 지하수 오염의 경우, 시료는 24항목을 분석하였으며, 19개 항목의 생활용수 기준을 포함한 TPH 정화기준에 대하여 분석을 실시함. 6개 지점 중 5개 지점에서 기준 초과하였고, 최고농도는 117.2 mg/L로 나타남. 나머지 항목은 불검출이거나 기준치 이하인 것으로 확인됨.
<p>■ 인간 건강 위해성/생태계 위해성</p> <ul style="list-style-type: none"> • 지적법에 의한 토지대장을 확인해본 결과 울타리 안 총면적은 약 159,820 m² 정도이며, 이중 잡종지(34.62%), 담(7.69%), 도로용지(9.62%)와 유지, 임야, 전, 구거등으로 구분.

Table 9. Probable data gap analysis for CSM at 2017

Profiles	데이터갭	개선 사항
시설 및 정보	• 부지 범위 확대	• 2017년: 70,000 m ² • 2019년: Y역 부근 3,852 m ² 추가
	• 부지이력 추가	• 2019년: Y역과 관련한 부지 이력 추가
부지특성	• 시추공 조사자료 추가	• 2019년: 토양오염이 확인된 위치에 설치된 지하수 관측정 설치 시 기록한 로깅지를 활용한 지질구조 분석 자료 추가
오염유출/확산	• 토양오염 조사자료 추가	• 2019년: 선로 근처 토양 시료 채취
	• 지하수 관측정 추가	• 2019년: 지하수 관측정 3개소 신규 설치
	• 오염물질 추가	• 2019년: 오염기준치를 초과한 납과 에틸벤젠 관측
토지이용과 노출특성	-	-
생태 및 문화적 자원	-	-

Table 10. Table CSM for source-pathway-receptor identification at 2019

오염원		경로		수용체		
시설	상태	위치	지중 경로	노출경로	잠재적 생태 수용체	인간
<일반지역(FS)> - 철도시설 - 송유통제관실 - 미군세차장 - 유수분리조 <유류 저장소> - 반지하 저장시설(TS) <유류 이송시설> - 지하 및 지상연결배관 - 철도 선로 및 송유관 시설	이동상 NAPL	지표	- 지표수의 흐름에 의한 NAPL의 수평적 유동: 강우 또는 계절적 물의 흐름	미확인	- 육상 식물(허브/풀) - 파충류 및 양서류 - 육상 무척추동물 (지렁이 및 곤충) - 야생동물 (조류 및 포유류)	미확인
		불포화대	- NAPL의 지표와 지하수면 사이의 수직적 유동 - 중력배수에 의한 운송: 비포화도양으로 기름 누출			
		포화대	- 지하수면에서 NAPL의 수평적 유동 - 중력배수에 의한 운송: 지하수면에서 일시적인 수직적 출렁임과 수리경사에 의한 NAPL의 수평적 유동			
	잔류상 NAPL	지표	- 토양에 잔류된 NAPL로 경로 없음			
		불포화대	- 토양 내 잔류 NAPL로 경로 없음			

Table 11. Narrative CSM at 2019

<p>■ 연구부지 설명</p> <ul style="list-style-type: none"> • Y역, 3,852 m²를 추가적으로 반영함. • 내부 부지 이력으로, 00저유소는 과거 미군이 사용하던 시설로서 1960년대부터 1992년까지 주한미군에서 직접 운영함. 반 지상화 저장탱크 7기를 제외한 일부 건물에 보일러를 설치하고, 일반 지하저장탱크로부터 유류를 공급받아 사용함. • 외부 부지 이력에는 00저유소 경계와 접하여 현재 운영 중인 Y역 철로(경원선 3, 4라인)가 존재하고 Y역 북동쪽으로는 민가 및 도로가 인접함. 주변 지역은 국유지 및 개인 필지로 특별한 오염개연성시설의 설치 사실은 확인이 되지 않음. 과거부터 지금까지 건물 위치 변동은 없으며, 일부 창고(1995년도)만 신설됨. 청취조사 중 조사대상 지역이 미군에 의해 관리되고 있던 시기에 우천 시 오염물질(기름)이 대상 지역에서 주변 소하천으로 흘러들었다는 이야기를 들을 수 있었음. 해당 QC지역 내부와 연결되는 송유관이 존재함. • 부지인접시설에는 00저유소 경계와 접하여 현재 운영 중인 Y역 철로(경원선 3, 4라인)가 있으며, Y역 북동쪽으로는 민가 및 도로가 인접함. <u>역사, 송유관시설이 있음.</u>
<p>■ 지질학적, 수리지질학적 특성</p> <ul style="list-style-type: none"> • 암석/토양의 특성: 사질양토, 양질사토, 식양토 • 총 2회에 걸쳐 관측정상부에서 지하수위까지의 깊이 측정한 결과 1~4 m 심도를 가짐 • 관측정 6개의 수리전도도는 $6.52 \times 10^{-7} \sim 4.41 \times 10^{-3}$ cm/sec²으로, 평균 2.93×10^{-4} cm/sec로 산정됨. • 새로 설치된 3개의 지하수 관측정에서 수리전도도는 각각 4.85×10^{-4}, 1.21×10^{-3}, 2.51×10^{-3} cm/sec로 산정됨. • 지하수 흐름은 지형이 높은 남쪽방향의 1구역에서 북쪽방향의 2구역으로 흐름. 2구역의 상부에서 발생한 토양오염은 수두구배 및 농도구배를 따라 2지역 하부(하천방향)으로 확산 및 이동하였을 가능성이 높음. 대상 지역에 나타나는 대표적인 지질구조선은 북동-남서 방향의 단층선으로 조사지역 북동부 경계지대를 흐르는 반지천(낙동강으로 유입)과 이연천상류 그리고 동연천지류를 따라 분포하고 있어 단층선이 유로 형성에 적지 않은 영향을 준 것으로 판단함.
<p>■ 오염 지역</p> <ul style="list-style-type: none"> • 오염유출시설이 일반지역(FS): 철도시설, 송유통제관실, 미군세차장, 유수분리조; 반지하저장시설(TS): 1, 2, 3, 6번 탱크 오염확인; 탱크 주변 배관(T): 3, 6번 탱크 배관. 오염이 확인된 곳으로 구체화됨. 철도 선로 및 송유관 시설(오염 개연성이 높은 것으로 조사됨) 등이 추가됨. • 대상지역에 분포하는 지하수의 흐름은 지형이 높은 남쪽방향의 1구역에서 북쪽방향의 2구역으로 흐름. 2구역의 상부에서 발생한 토양오염은 수두구배 및 농도구배를 따라 2지역 하부(하천방향)으로 확산 및 이동하였을 가능성이 높은 것으로 판단. • 2012년 “한국군 군사시설 및 철도시설 토양정밀조사” 과업의 일부로, 환경부가 보유하고 있는 국가오염부지목록(NCSI) 중 조사 우선 순위에 의해 토양정밀조사 대상지로 채택됨.
<p>■ 오염의 종류와 범위</p> <ul style="list-style-type: none"> • 오염물질은 TPH와 벤젠, 톨루엔, 크실렌, 에틸벤젠, 납 • 토양오염의 경우, 2019년 9월 23일 ~ 9월 25일의 개회조사에서 오염이 확인된 지점을 중심으로 시료를 채취함. 총 13개 지점에 대한 상세조사는 20개 지점에서 135개 시료를 채취하여 TPH, BTEX 항목에 대한 분석을 실시함. 주변지역의 5개 지점에서 토양오염 우려기준을 초과하였으며, 토염오염우려기준을 초과한 남이 3심도(2.0~3.0 m), 4심도(3.0~4.0 m), 5심도(4.0~5.0 m) 범위에서 확인됨. 지하수의 경우, 지하수 관측정을 3개소 신규 설치하고 3회에 걸쳐 지하수를 채취 및 분석한 결과 지하수수질기준을 초과하지 않음.
<p>■ 인간 건강 위해성/생태계 위해성</p> <ul style="list-style-type: none"> • 지적법에 의한 토지대장을 확인해본 결과 울타리 안 총면적은 약 159,820 m² 정도이며, 이중 잡종지(34.62%), 담(7.69%), 도로용지(9.62%)와 유지, 임야, 전, 구거 등으로 구분.

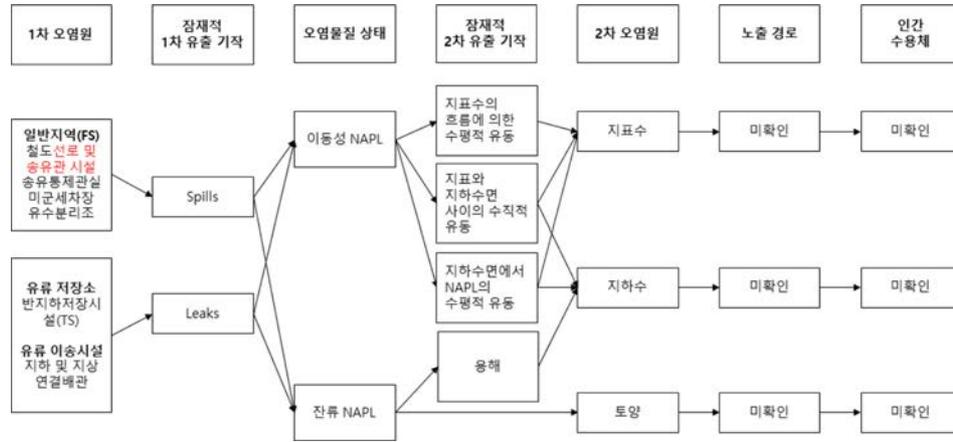


Fig. 5. Flowchart CSM for describing contaminant pathways at 2019.

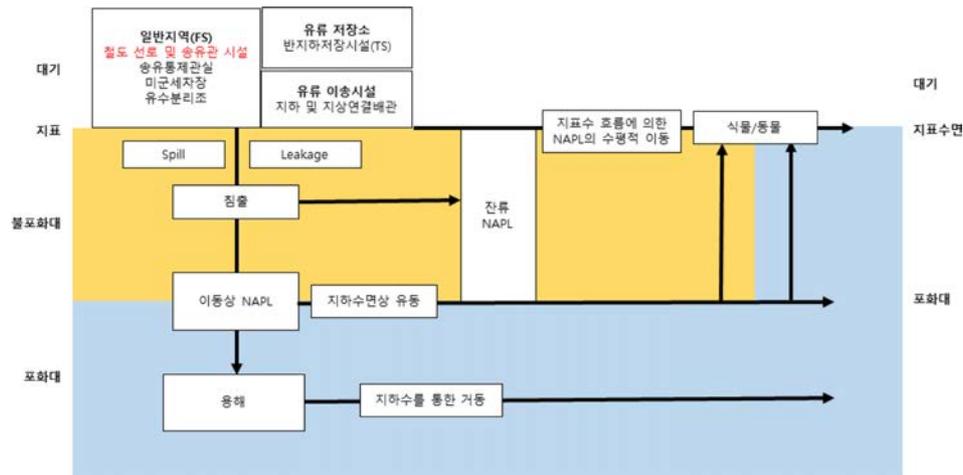


Fig. 6. Diagrammatic CSM for describing processes of contaminant fate and transport at 2019.

Table 12. Probable data gap analysis for CSM at 2019

Profiles	데이터갭	개선 사항
시설 및 정보	-	-
부지특성	<ul style="list-style-type: none"> • 미시추구간에 대한 지반특성 자료 부족 • 심도별, 구간별 지반 특성 자료 필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 심도별 시추조사 결과 추가 • 미시추구간에 대한 물리탐사를 통해 지질이상대 및 토양오염우려구간 파악 • 토양오염이 확인된 위치에 설치된 지하수 관측정 설치 시기록한 로그지를 토대로 정리한 지질구조 추가 • 토양이화학 조사자료 추가 • 새로 설치된 3개의 지하수 관측정으로부터 산정된 수리전도도 추가 • 지하수 유향, 유속시험 수행 결과 추가 • 실내시험: 기본물성시험 및 일축압축시험과 같은 압축시험 수행
오염유출/확산	<ul style="list-style-type: none"> • 오염이 확인되지 않았으나 추가적인 오염이 예상되는 지점과 오염물질 존재 • 시료 채취 기반의 지점별 오염 특성 자료에 한정적 • 부지 단위의 오염 거동 특성 자료 필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 오염물질에 에틸벤젠과 납 추가 • 2019년 7월 선로 및 송유관시설 등의 주변지역에서의 개황조사자료 추가 • 2019년 9월에 개황조사에서 오염이 확인된 지점 중심으로 상세조사자료 추가 • 심도 및 구간별 오염량 조사자료 추가 • 지하수 관측정 추가 • 지하수 유동장 및 오염거동모델링을 통한 오염예측결과 추가, 산정된 오염량보다 정밀도 개선, 미조사 지점 및 오염플룸과 오염플룸 사이의 의심지역에 대한 오염량 재산정
토지이용과 노출특성	<ul style="list-style-type: none"> • 위해성평가를 위한 수용체와 구체적인 노출경로 자료 필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 증기에 의한 부지 내 주민의 불편감 발생
생태 및 문화적 자원	-	-

도별 층서특성 및 지반 추정에 어려움이 있었다. 또한 수용체 관련 정보의 부재로 위해성 평가 대상이 불분명한 점이 개선될 필요가 있었다. 이러한 데이터 갭 해석을 기반으로 한 개선 사항을 Table 12에 제시하였다.

4.7. 4차 정밀부지특성화 결과 기반의 최종 부지개념모델 작성

정화설계를 위해 수행한 가장 정밀한 수준의 조사에서 Table 3의 항목 중 불포화대에서의 증기침입 경로가 주요하게 추가되었다. 증기 오염에 의한 인체 위해성 평가 대

Table 13. Table CSM for source-pathway-receptor identification at 2020

오염원			경로		수용체	
시설	상태	위치	지중 경로	노출경로	잠재적 생태 수용체	인간
<일반지역(FS)> - 철도시설 선로 및 송유관시설 - 송유통계관실 - 미군세차장 - 유수분리조 <유류 저장소> - 반지하 저장시설(TS) <유류 이송시설> - 지하 및 지상연결배관	이동상 NAPL	지표	- 지표수의 흐름에 의한 NAPL의 수평적 유동: 강우 또는 계절적 물의 흐름	미확인	- 육상 식물 (허브/풀) - 피층류 및 양서류 - 육상 무척추동물 (지렁이 및 곤충) - 야생동물 (조류 및 포유류)	증기를 통한 섭취 노출 대상자
		불포화대	- NAPL의 지표와 지하수면 사이의 수직적 유동 - 중력배수에 의한 운송: 불포화도양으로 기름누출			
		포화대	- 지하수면에서 NAPL의 수평적 유동 - 중력배수에 의한 운송: 지하수면에서 일시적인 수직적 출렁임과 수리경사에 의한 NAPL의 수평적 유동			
	잔류상 NAPL	지표	- 토양에 잔류된 NAPL로 경로 없음	얕은 토양에서 잔류 NAPL에 대한 접촉, 우발적 섭취 및 흡입, 노출		
불포화대		- 휘발에 의한 운송: 영향을 받은 지하 토양으로부터 증기 발생	증기를 통한 섭취, 노출			

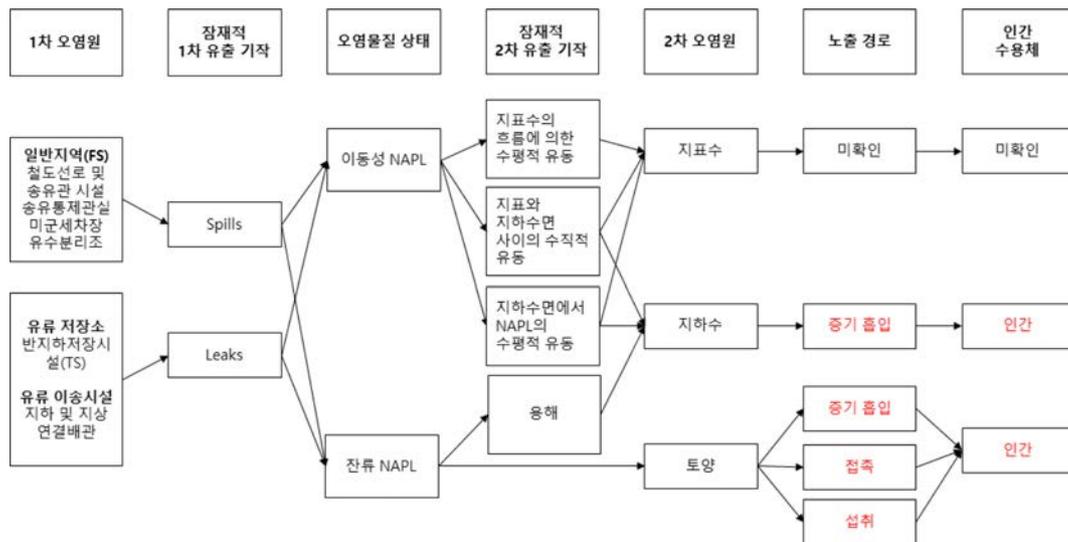


Fig. 7. Flowchart CSM for describing contaminant pathways at 2020.

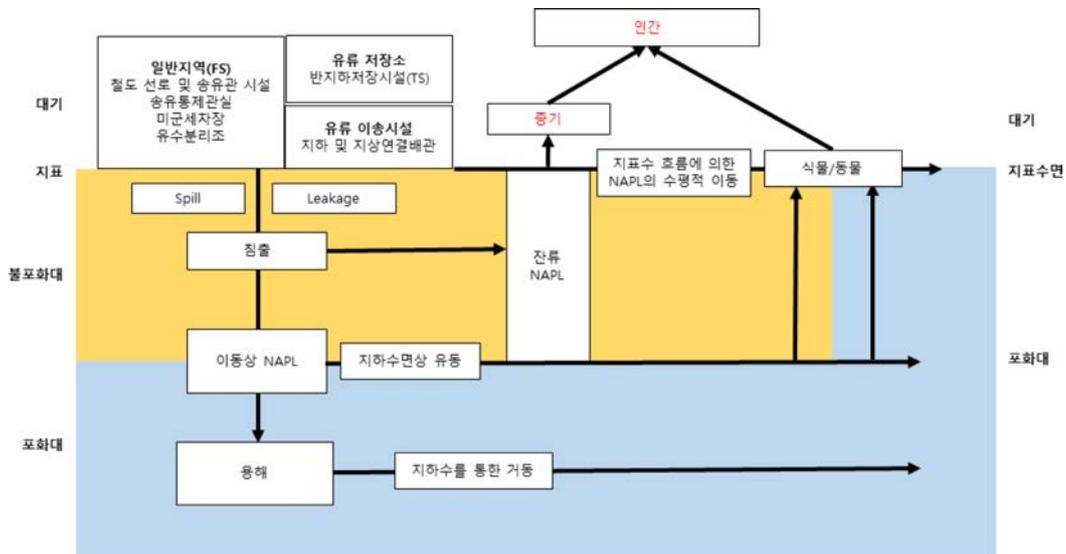


Fig. 8. Diagrammatic CSM for describing processes of contaminant fate and transport at 2020.

Table 14. Narrative CSM at 2020

<p>■ 연구부지 설명</p> <ul style="list-style-type: none"> • Y역. 3,852 m²를 추가적으로 반영함 • 내부 부지 이력으로, 00저유소는 과거 미군이 사용하던 시설로서 1960년대부터 1992년까지 주한미군에서 직접 운영함. 반 지상화저장탱크 7기를 제외한 일부 건물에 보일러를 설치하고, 일반 지하저장탱크로부터 유류를 공급받아 사용함. • 외부 부지 이력에는 00저유소 경계와 접하여 현재 운영 중인 Y역 철로(경원선 3, 4라인)가 존재하고 Y역 북동쪽으로는 민가 및 도로가 인접함. 주변 지역은 국유지 및 개인 필지로 특별한 오염개연성시설의 설치 사실은 확인이 되지 않음. 과거부터 지금까지 건물 위치 변동은 없으며, 일부 창고(1995년도)만 신설됨. 청취조사 중 조사대상 지역이 미군에 의해 관리되고 있던 시기에 우선 시 오염물질(기름)이 대상 지역에서 주변 소하천으로 흘러들었다는 이야기를 들을 수 있었음. 해당 QC지역 내부와 연결되는 송유관이 존재함. • 부지인접시설에는 00저유소 경계와 접하여 현재 운영 중인 Y역 철로(경원선 3, 4라인)가 있으며, Y역 북동쪽으로는 민가 및 도로가 인접함. 역사, 송유관시설이 있음.
<p>■ 지질학적, 수리지질학적 특성</p> <ul style="list-style-type: none"> • 총 2회에 걸쳐 관측정상부에서 지하수위까지의 깊이 측정한 결과 1~4 m 심도를 가짐 • 관측정 6개의 수리전도도는 $6.52 \times 10^{-7} \sim 4.41 \times 10^{-3}$ cm/sec 으로, 평균 2.93×10^{-4} cm/sec 로 산정됨. • 이후 설치된 3개의 지하수 관측정에서 수리전도도는 각각 4.85×10^{-4}, 1.21×10^{-3}, 2.51×10^{-3} cm/sec 로 산정됨. • 지하수 흐름은 지형이 높은 남쪽방향의 1구역에서 북쪽방향의 2구역으로 흐름. 2구역의 상부에서 발생한 토양오염은 수두구배 및 농도구배를 따라 2지역 하부(하천방향)으로 확산 및 이동하였을 가능성이 높음. 대상 지역에 나타나는 대표적인 지질구조선은 북동-남서 방향의 단층선으로 조사지역 북동부 경계지대를 흐르는 반지천(낙동강으로 유입)과 이연천상류 그리고 동연천지류를 따라 분포하고 있어 단층선이 유로 형성에 적지 않은 영향을 준 것으로 판단함.
<p>■ 오염 지역</p> <ul style="list-style-type: none"> • 오염유출시설이 일반지역(FS): 철도시설, 송유통제관실, 미군세차장, 유수분리조; 반지하저장시설(TS): 1, 2, 3, 6번 탱크 오염확인; 탱크 주변 배관(T): 3, 6번 탱크 배관. 오염이 확인된 곳으로 구체화됨. 철도 선로 및 송유관 시설(오염 개연성이 높은 것으로 조사됨) 등이 추가됨. • 대상지역에 분포하는 지하수의 흐름은 지형이 높은 남쪽방향의 1구역에서 북쪽방향의 2구역으로 흐름. 2구역의 상부에서 발생한 토양오염은 수두구배 및 농도구배를 따라 2지역 하부(하천방향)으로 확산 및 이동하였을 가능성이 높은 것으로 판단. • 2012년 “한국군 군사시설 및 철도시설 토양정밀조사” 과업의 일부로, 환경부가 보유하고 있는 국가오염부지목록(NCSI) 중 조사우선 순위 에 의해 토양정밀조사 대상으로 채택됨.
<p>■ 오염의 종류와 범위</p> <ul style="list-style-type: none"> • 오염물질은 TPH와 벤젠, 톨루엔, 크실렌, 에틸벤젠, 납 • 토양 오염의 경우, A~D type 결과: TPH, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌의 우려기준 초과 면적은 39,460 m²이고 오염 물량은 58,414 m³ 로 산정, 기행철로결과: 오염물량(3지역 기준)을 762 m³로 산정 • 지하수 관측을 위해 관측정을 최초 4개소(BH-01~04) 설치, 이후 추가설치관정(DW-01~03)에 대해 3회에 걸쳐 지하수를 채취 및 분석한 결과, 지하수수질기준을 초과하지 않음 • 모델링을 통한 지하수 유동 및 오염 거동 예측 모델을 오염 범위 산정에 활용함.
<p>■ 인간 건강 위해성/생태계 위해성</p> <ul style="list-style-type: none"> • 지적법에 의한 토지대장을 확인해본 결과 울타리 안 총면적은 약 159,820 m² 정도이며, 이중 잡종지(34.62%), 답(7.69%), 도로용지(9.62%)와 유지, 임야, 전, 구거등으로 구분.

상자가 확인되었으며, 이에 따른 오염 시나리오가 Table 13, 14와 Fig. 7, 8의 부지개념모델에 반영되었다.

5. 결 론

지중환경의 오염은 인지, 조사, 의사결정, 복원 등의 관리과정에 오랜 시간이 소요되어, 장기간의 부지 관리가 요구된다. 이 과정에서 정밀부지특성화를 위해 보완, 반복되는 오염조사는 오염부지에 대한 정보를 지속적으로 갱신하며, 다수의 지점에서 다양한 시점에 다양한 항목에 대해 조사한 자료가 누적되게 되어, 오염부지의 이력과 현황은 파악하는데 어려움이 있을 수 있다. 정밀조사가 반복적으로 수행된 오염부지의 효율적인 부지 관리 전략 수립은 부지 조사자료 관리로부터 시작된다. 기존 정밀조사 보고서는 각 단계별 조사 목적에 따라 수행된 조사 결과가 기술되어 있으며 동일 부지 내에서 차후 수행될 조사에 대한 기반 자료로써 역할을 하기에 어려운 구성을 갖추고 있었다. 따라서 동일한 부지에서 수행된 조사임에도 불구하고 조사 시점에 따라 이전 조사자료의 활용성이 낮아질 수 있다.

부지개념모델은 부지내 오염의 원인과 경로 및 인체 및 생태에 미치는 영향에 관련된 환경적 조건 및 과정에 대한 표현방법으로서 오염부지에 대한 이해를 돕고, 의사결정을 지원하기 위한 도구로서 개발되었다. 부지개념모델 작성을 국내에 도입하여 정착시키기 위해서는 부지개념모델의 효용성을 평가하기 위한 사례가 필요하기에, 본 연구에서는 4차에 걸쳐 토양 정밀 조사가 진행된 국내 Y부지를 대상으로 부지개념모델의 작성 및 개선 사례를 구축하였다. 다양한 형식의 부지개념모델 작성 및 개선된 사례는 부지개념모델의 작성이 국내에서도 오염부지의 이력 및 현황 파악과 보완조사 계획에 유용함을 보여주었다.

향후 국내에 부지개념모델 작성을 제도화 할 경우, 부지개념모델 작성을 위해 수행하는 부지정보의 요약(Profiles)이 조사결과의 정리에 특히 유용한 것으로 판단되며, 이때 사용하는 자료 분류체계는 지중환경관리를 위한 통합적 데이터 관리 체계에서 표준 자료 형식의 기초로 발전될 가능성이 높을 것으로 생각된다. 주제에 따라 다양한 형식으로 표현될 수 있는 부지개념모델의 표준적 형식이 제안될 경우 조사 보고서 작성의 통일성을 확보하고, 부지의 상태 변화를 식별하는데 도움이 될 것으로 기대된다. 또한 체계적이고 효율적인 부지관리를 위해서는

조사 데이터의 격차를 식별하는 “Data gap analysis”를 독립된 절차로 마련하는 것도 고려해볼만 하다.

사 사

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

References

- Bae, M.S., Kim, J.H., Lee, S., Kwon, M.J., and Jo, H.Y., 2022, Development and enhancement of conceptual site model for subsurface environment management, *J. Soil Groundwater Environ.*, **27**, 1-18.
- Dam, W.L., Campbell, S., Johnson, R.H., Looney, B.B., Denham, M.E., Eddy-Dilek, C.A., and Babits, S.J., 2015, Refining the site conceptual model at a former uranium mill site in Riverton, Wyoming, USA, *Environ. Earth Sci.*, **74**, 7255-7265.
- Hwang, S.I. and Lee, Y.H., 2004, Developing an efficient information management system for soil contaminated sites, *Korea Environment Institute*, **2004**, 1-130.
- 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/>.
- Kim, J.H., Bae, M.S., Kwon, M.J., Jo, H.Y., and Lee, S., 2022, Construction of a preliminary conceptual site model based on a site investigation report for area of concerns about groundwater contamination, *J. Soil Groundwater Environ.*, **27**, 64-74.
- NJDEP, 2019, Technical Guidance for Preparation and Submission of a Conceptual Site Model, New Jersey Department of Environmental Protection.
- USEPA, 2011, Environmental cleanup best management practices: Effective use of the project life cycle conceptual site model, OSWER (5102G), EPA 542-F-11-011.
- Utom, A.U., Werban, U., Leven, C., Müller, C., and Dietrich, P., 2019, Adaptive observation-based subsurface conceptual site modeling framework combining interdisciplinary methodologies: a case study on advancing the understanding of a groundwater nitrate plume occurrence, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **26**, 15754-15766.

Supplementary data

Supplementary Table 1. Profiles of Y site at various site investigation phases

Profile 구분		2012	2017	2019	2020	
시설 및 부지 정보	오염 유출지점	<ul style="list-style-type: none"> • AST, UST, 펌프실, 지하 및 지상연결배관 등으로 추정 	<ul style="list-style-type: none"> • 일반지역(FS): 철도시설, 송유통제관실, 미군세차장, 유수분리조 • 반지하저장시설(TS): 1, 2, 3, 6번 탱크 오염확인 • 탱크 주변 배관(T): 3, 6번 탱크 배관 오염확인 	<ul style="list-style-type: none"> • 선로 및 송유관 시설 등 (오염 개연성이 높은 것으로 조사됨) 		
	부지범위	<ul style="list-style-type: none"> • AST, UST, 펌프실, 지하 및 지상연결배관 등이 존재하여 유류오염 가능성이 있는 지역 • 면적: 20,475 m² 	<ul style="list-style-type: none"> • 00저유소 및 인접지역을 포함하여 확대 • 면적 70,000 m² (약 2만 1천평) 	<ul style="list-style-type: none"> • Y역(경상북도 OO군 OO면) 3,852 m² 을 추가함 	<ul style="list-style-type: none"> • 경상북도 OO군 OO면 위치 • 면적 70,000 m² 	
	부지이력	내부	<ul style="list-style-type: none"> • 1970.12, 장거리 송유관 준공(포항-서울, 미군) • 1981. 01, 50,000Bbl 탱크 7기 건설 개시 (중전 10,000Bbl 철거) • 1982. 11, 50,000Bbl 탱크 7기 중 3기 건설 완료(TANK 및 지상배관 지하화) • 1984. 12, 50,000Bbl 탱크 4기 추가 건설완료(TANK 및 지상배관 지하화) • 1992. 6. 13, TKP 저장소 및 송유관 시설 주한미군 → 국방부(육군)로 이관(이관과 동시 SK(주)(구 대한석유공사) 위탁관리) • 1999. 10, 대한송유관공사 위탁관리 	<ul style="list-style-type: none"> • 00저유소는 과거 미군이 사용하던 시설로서 1960년대부터 1992년까지 주한 미군에서 직접 운영 • 반 지하화저장탱크 7기를 제외한 일부 건물에 보일러를 설치하고, 일반 지하 저장탱크로부터 유류를 공급받아 사용함. 	<ul style="list-style-type: none"> • Y역은 1967년에 운영시작 • 2008년 여객수송중지 • 과거 군부대가 자리잡고 있어서 유류 저장소 및 군용화물취급을 위한 전용선이 설치되어 있는 것으로 확인 • 현재 열차는 운행하지만 역사는 폐쇄 	<ul style="list-style-type: none"> • 해당 부지 내 50,000배럴 용량의 반지하화 저장탱크 • 7기에 대한 오염도 검사가 2004년부터 현재까지 6회 이루어졌고, 6회에 걸친 토양오염도검사 결과 TPH와 BTEX 항목에서 적합판정. • 7기의 반지하화 저장탱크에 대한 누출 검사는 이루어지지 않음.
		외부		<ul style="list-style-type: none"> • 00저유소 경계와 접하여 현재 운영 중인 Y역 철로(경원선 3,4라인) • Y역 북동쪽으로는 민가 및 도로가 인접 • 주변지역은 국유지 및 개인필지로 특별한 오염개연성 시설의 설치사실은 확인이 되지 않음. • 과거부터 지금까지 건물위치 변동은 없으며, 일부 창고(1995년도)만 신설 • 청취조사 중 조사대상지역이 미군에 의해 관리되고 있던 시기에는 우천시 오염물질(기름)이 대상지역에서 주변 소하천으로 흘러들었다는 이야기를 들을 수 있었음. • QC지역 내부와 연결되는 송유관이 존재함. 		
부지 인접시설			<ul style="list-style-type: none"> • 00저유소 경계와 접하여 현재 운영 중인 Y역 철로(경원선 3,4라인) • Y역 북동쪽으로는 민가 및 도로가 인접 	<ul style="list-style-type: none"> • 역사, 송유관시설 	<ul style="list-style-type: none"> • 고속도로와 철로가 지역을 인접하여 통과 	

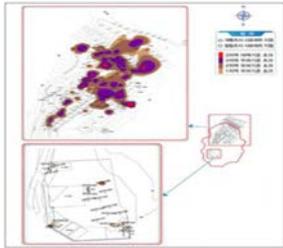
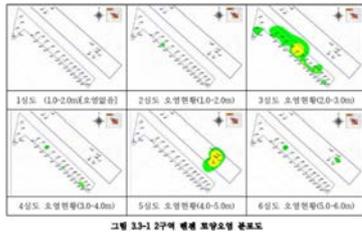
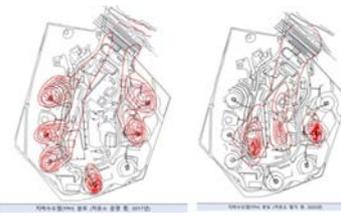
Supplementary Table 1. continued

Profile 구분		2012	2017	2019	2020	
부지 특성	암석의 특성	• 사질양토, 양질사토, 식양토	• 사질양토, 양질사토	• 사질양토, 양질사토, 식양토	<ul style="list-style-type: none"> • 평지 지형: 신기하성층으로 대표암상은 사력점토 및 이토이며 신생대 제4기임. • 산지 지형: 경상계 낙동층군 낙동층이며 대표암상은 암회색이암, 사암, 셰일 및 갈색 역암이고 시대는 중생대 백악기-유라기임. 	
	지질구조			• 토양오염이 확인된 위치에 설치된 지하수 관측정 설치 시 기록한 시추공 로깅 자료	지표지질조사, 전기비저항탐사, 시추조사, 표준관입시험, 공내전단시험 수행	
	토양 이화학 특성	pH 8.23~7.23, 평균 7.85 총 유기물함량 평균 0.75% 총 유기탄소함량 0.44% 양이온교환용량 평균 12.28 cmol/kg 수분함량 평균 11.07% 가비중 1.60~1.67 g/cm ³ 진비중 평균 2.52 g/cm ³ 유류분해미생물균수 기하평균 6.9×10 ⁴ MPN/g dry soil	총 유기물함량 평균 1.01% 가비중 1.20~.22 g/cm ³ 진비중 평균 1.33 g/cm ³ 유류분해미생물균수 산출평균 1.66×10 ³ MPN/g dry soil 유효인산 평균 5.4 mg/kg 질산성 질소 평균 5.83 mg/kg 암모니아성 질소 평균 9.33 mg/kg	pH 8.0 총 유기물함량 0.49% 양이온교환용량 2.0 cmol/kg 수분함량 13.9% 가비중 1.55 g/cm ³ 진비중 3.89 g/cm ³ 유효인산 28.98 mg/kg 전 질소 0.060 mg/kg	실내토질시험, 실내암석시험 자료 참고	
	지하수 특성	pH 6.21~6.72 전기전도도 201~399 μs/cm 용존산소 2.7~46 mg/L 산화환원전위 93~151 mV 온도 20.5~21.5°C	pH 6.7~7.4 전기전도도 259 ~ 664 μs/cm 용존산소 0.7~3.7 mg/L 산화환원전위 -175~15 mV 온도 12~18°C			
	수리 지질 특성	지하수 흐름	<ul style="list-style-type: none"> • 지형이 높은 남쪽방향의 1구역에서 북쪽방향의 2구역으로 흐름. • 2구역의 상부에서 발생한 토양오염은 수두구배 및 농도구배를 따라 2지역 하부(하천방향)으로 확산 및 이동하였을 가능성이 높은 것으로 판단 			지하수 유량, 유속시험 자료 참고
		지하수위		<ul style="list-style-type: none"> • 총 2회에 걸쳐 관측정 상부에서 지하수위까지의 깊이 측정 GW01 43.53 m 지하수위 2.57, 2.56 m GW02 43.65 m 지하수위 2.70, 2.72 m GW03 44.15 m 지하수위 3.35, 3.36 m GW04 45.79 m 지하수위 1.65, 1.74 m GW05 46.24 m 지하수위 1.08, 1.07 m GW06 56.43 m 지하수위 1.23, 1.23 m 		<ul style="list-style-type: none"> • 지하수위 2020년 07월 30일부터 매일 16시에 측정. 과거 유동성 오일 회수관정 12개소, 신규관측공 7개소 모두 측정함. • 다만 신규관정 중 BH-03의 경우는 장마철 상류토사 유실로 인한 관정파손이 있어 측정데이터에서 제외 • 기존 관정에 대한 수위측정은 2020년 07월 30일부터 매일 16시에 실시하였으며, 기상 악화로 인한 미실시와 주말을 제외하고 측정
		수리 전도도 (cm/sec)	<ul style="list-style-type: none"> • 관측정 6개에서 관측하였으며, 최소 1.91×10⁻⁴, 최대 3.83×10⁻⁴, 기하평균 2.93×10⁻⁴ • 대수층은 전반적으로 투수성이 양호 	<ul style="list-style-type: none"> • 관측정 6개에서 관측하였으며, 최소 6.52×10⁻⁷, 최대 4.41×10⁻³, 평균 2.93×10⁻⁴ 	<ul style="list-style-type: none"> • 새로 설치된 3개의 관측정 • 각각 4.85×10⁻⁴, 1.21×10⁻³, 2.51×10⁻³ 	현장투수시험, 현장수압시험 자료 참고
	Utilities/ preferential pathways	<ul style="list-style-type: none"> • 대상 지역의 대표적 지질구조선은 북동-남서 방향의 단층선으로 조사지역 북동부 경계지대를 흐르는 반지천(낙동강으로 유입)과 이연천 상류 그리고 동연천 지류를 따라 분포하고 있어 단층선이 유로 형성에 적지 않은 영향을 준 것으로 판단 				

Supplementary Table 1. continued

Profile 구분	2012	2017	2019	2020
오염물질	• TPH와 벤젠, 톨루엔, 크실렌	• TPH와 벤젠, 톨루엔, 크실렌	• TPH와 벤젠, 톨루엔, 크실렌, 에틸벤젠, 납	• TPH와 벤젠, 톨루엔, 크실렌, 에틸벤젠
발견날짜	2012년	• 2012년 한국환경공단에서 Y역과 일부 부지 및 시설들에 대한 「군사기지 환경관리 및 정화사업」 중 2012년 “한국군 군사시설 및 철도 시설 토양정밀조사” 과업의 일부로, 환경부가 보유하고 있는 국가오염부지목록(NCSI) 중 조사우선 순위에 의해 토양정밀조사가 수행		
경로	• 대상지역에 분포하는 지하수의 흐름은 지형이 높은 남쪽방향의 1구역에서 북쪽방향의 2구역으로 흐름. • 2구역의 상부에서 발생한 토양오염은 수두구배 및 농도구배를 따라 2지역 하부(하천방향)으로 확산 및 이동하였을 가능성이 높은 것으로 판단.			
오염 유출 / 확산	<p><개황조사></p> <ul style="list-style-type: none"> • 35개 지점 155개 시료 채취 • TPH: 2개 지점 2개 시료에서 최고 농도 3,312.8 mg/kg 3지역 기준을 초과 • 벤젠: 1개 지점 2개 시료에서 최고농도 9.45 mg/kg • 크실렌: 1개 지점 1개시료에서 67.37 mg/kg 농도로 3지역 기준을 초과 • 톨루엔, 에틸벤젠: 3지역 기준을 초과하지 않음. <p><상세조사></p> <ul style="list-style-type: none"> • 두 구역으로 나눠서 조사 수행 <p><1구역></p> <ul style="list-style-type: none"> • TPH: 최고농도 665.70 mg/kg으로 '1지역' 토양오염 우려기준을 초과 • 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌: 우려기준 미만 <p><2구역></p> <ul style="list-style-type: none"> • TPH: 최고농도 10170.50 mg/kg으로 3지역 기준을 초과 • 벤젠: 최고농도 13.57 mg/kg으로 3지역 기준을 초과 • 톨루엔: 최고농도 284.46 mg/kg으로 3지역 기준을 초과 • 에틸벤젠: 최고농도 103.14 mg/kg • 크실렌: 96.93 mg/kg으로 3지역 기준초과 	<p><개황조사></p> <ul style="list-style-type: none"> • TPH: 최고농도는 10,674 mg/kg으로 토양오염 우려기준 및 대책기준을 초과 • 벤젠: 최고농도 9.2 mg/kg으로 토양오염우려 기준 및 대책기준을 초과 • 크실렌: 최고농도 80.6 mg/kg으로 토양오염 우려기준을 초과 • 톨루엔: 최고농도 20.6 mg/kg • 에틸벤젠: 토양오염우려기준 이하로 확인 <p><상세조사></p> <ul style="list-style-type: none"> • 개황조사에서 오염이 확인됨에 따라 오염이 확인된 지점을 중심으로 시료채취 진행 	<p><개황조사></p> <ul style="list-style-type: none"> • TPH: 13개지점에서 토양오염우려기준의 70% 또는 초과 • 나머지 지점의 조사한 분석항목은 상세조사 대상기준 이하이거나 불검출. <p><상세조사></p> <ul style="list-style-type: none"> • 주변지역: 5개지점에서 토양오염우려기준을 초과 • 납: 토양오염우려기준을 초과 	<p><정밀조사></p> <ul style="list-style-type: none"> • 토양시료채취깊이는 표토 ~ 최대 지하 10.0 m • 수직적분포조사는 지표면에서 오염확인깊이 까지로 하여 1.0 m 간격으로 1점 이상의 시료 채취 <p><Atype 정밀조사결과></p> <ul style="list-style-type: none"> • 벤젠: 최고농도 21.2 mg/kg • 톨루엔: 최고농도 161.2 mg/kg, • 에틸벤젠: 최고농도 126.3 mg/kg • 크실렌: 최고농도 454.2 mg/kg으로 • BTEX: 7개 지점 10개시료에서 토양오염우려 기준을 초과 • TPH: 최고농도 5,223 mg/kg을 초과 • 총 71개지점 225개시료 중 28개지점 38개 시료에서 BTEX와 TPH의 토양오염우려기준을 초과 <p><Btype추가조사결과></p> <ul style="list-style-type: none"> • 크실렌: 최고농도 59 mg/kg • 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠: 토양오염우려기준을 초과하지않음. <ul style="list-style-type: none"> • TPH: 최고농도 6,901 mg/kg을초과 <p><Ctype추가조사결과></p> <ul style="list-style-type: none"> • BTEX: 28개지점 109개 시료, 토양오염우려 기준을 초과하지않음 • TPH: 최고농도 10,434 mg/kg로조사 <p><Dtype추가조사결과></p> <ul style="list-style-type: none"> • BTEX: 16개지점 140개 시료, 토양오염우려 기준을 초과하지않음. • TPH: 최고농도 8,440 mg/kg로조사 <p><가행철로토양오염조사></p> <ul style="list-style-type: none"> • BTEX: 16개지점 140지점에 대하여는 토양오염우려기준을 초과하지않음. • TPH: 최고농도 8,440 mg/kg <p><중질유토양오염조사></p> <ul style="list-style-type: none"> • 12년 토양정밀조사를 토대로 한 유증검토결과 Type C에 대한 TPH Chromatogram의 형태적 유사성이 발견된 중질유조사지점에 대하여 추가조사를 실시한 결과 TPH Chromatogram의 형태적유사성이 비슷한 중질유를 확인하였으나 중질유 복합오염의 중질유 부분은 5% 이하 수준
오염농도				

Supplementary Table 1. continued

<p>오염 유출 / 확산</p>	<p>오염범위</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 개황조사에서 토양오염은 전 구역에 걸쳐 확인되며 오염농도 및 오염 깊이는 구역별로 차이를 보임. • 정밀조사에서 2구역의 오염은 지표하 0~5 m까지 나타남. • 3지역을 초과하는 오염은 주로 공정지역, 물류창고의 AST, 펌프실 주변 배관, 유류 분배지역 및 외부로 연결된 송유관로 주변에서 나타남. • 3지역 기준을 초과한 대부분의 오염은 지표에서 2 m 이내로 나타났고, 최대 4 m까지 오염이 확인됨. • 1구역의 TPH 기준초과면적은 1지역 기준으로 40 m², 2지역으로 0 m² 으로 미량의 오염 확인. • 2구역은 TPH 기준초과면적은 3지역 기준으로 4,530 m², 기준초과부피는 5,740 m³ 이며, 오염물질별 기준초과면적과 기준초과부피가 계산되어 제시됨. 	<ul style="list-style-type: none"> • 일반지역(FS):오염 확인된 지점 최대 심도는 E.L. - 42.0 m • 반지하 저장시설(TS): 오염 확인 지점 최대심도는 E.L. - 62.0 m • 탱크주변 배관(T): 오염 확인 지점 최대심도는 E.L. - 58.0~57.0 m • “3지역” 토양오염우려기준을 초과한 오염면적은 약 10,462.1 m², 오염토량은 약 13,133.3 m³ • “2지역” 토양오염우려기준을 초과한 오염면적은 약 31,511.6 m², 오염 토량은 약 56,284.3 m³ • “1지역” 토양오염우려기준을 초과한 오염면적은 약 40,054.6 m², 오염토량은 약 80,429.4 m³ 	<ul style="list-style-type: none"> • 남: 3심도(2.0~3.0 m), 4심도(3.0~4.0 m), 5심도(4.0~5.0 m) 범위에서 확인 	<ul style="list-style-type: none"> • A~D type 결과: TPH, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌의 우려기준 초과 면적은 39,460 m²이고 오염 물량은 58,414 m³로 산정 • 가행철로결과: 오염물량(3지역기준)을 762 m³로 산정
<p>지하수오염</p>	<p>지하수오염</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 지하수 관측정을 7개 설치하고(2012년 9월 19일), 각 관측정에서 시료를 1회 채수하여 TPH, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌, TCE, PCE 항목에 대해 분석, 지하수오염 물질은 지하수 생활용수기준을 적용. • TPH 항목만이 3,098.80 mg/kg으로 지하수 생활용수 기준을 초과하고 나머지 항목은 기준 미만. 	<ul style="list-style-type: none"> • 시료는 24항목을 분석하였으며, 19개 항목의 생활용수 기준을 포함한 TPH 정화기준에 대하여 분석을 실시 • 6개 지점 중 5개 지점에서 기준 초과하였고, 최고농도는 117.2 mg/L • 나머지 항목은 불검출이거나 기준치 이하인 것으로 확인 	<ul style="list-style-type: none"> • 지하수 관측정 3개소 신규 설치하고 3회에 걸쳐 지하수를 채취 및 분석 • 지하수 수질기준을 초과하지 않음. 	<ul style="list-style-type: none"> • 지하수 관측정을 최초 4개소(BH-01~04) 설치, 이후 추가 설치관정(DW-01~03)에 대해 3회에 걸쳐 지하수를 채취 및 분석 • 지하수 수질기준을 초과하지 않음.
<p>거동 예측</p>	<p>거동 예측</p>				
<p>토지 이용 및 노출 특성</p>	<p>토지이용</p>		<ul style="list-style-type: none"> • 지적법에 의한 토지대장을 확인해본 결과 울타리 안 총면적은 약 159,820 m² 정도이며, 이중 잡종지(34.62%), 답(7.69%), 도로용지(9.62%)와 유지, 임야, 전, 구거 등으로 구분. 		
<p>생태 및 문화적 자원</p>					