

지중환경 관리를 위한 부지개념모델 구축 및 개선

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

¹스마트 지중환경 관리 기술 연구단

²고려대학교 지구환경과학과

Development and Enhancement of Conceptual Site Model for Subsurface Environment Management

Min Seo Bae^{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

A conceptual site model is used to support decision-making of response strategy development, determination, and implementation within a risk-based contaminated site management system. It aims to provide base information of the relevant site characteristics and surface/subsurface conditions in order to understand the contaminants of concern and the associated risk they pose to the receptors. This study delineated the technical details of conceptual site model development, and discussed the possibility of applying it in domestic subsurface contamination management. Conceptual site models can be developed in various formats such as tables, diagrams, flowcharts, and figures. Contaminated sites are managed for a long period of time following the steps of investigation, remediation design, remediation, verification, and post-remediation management. The conceptual site model can be enhanced in each stage of the contaminated site management based on the continuously updated information on the site's subsurface environment. In the process of enhancement for conceptual site model, precision is gradually improved, and it can evolve from a conceptual and qualitative form to a more quantitative and three-dimensional model. In soil pollution management, it is desirable to incorporate the conceptual site model into the soil scrutiny system to better assess the current status of the contaminated site and support follow-up investigation and management.

Key words : Site management, Conceptual site model, Development, Enhancement, Soil scrutiny system

1. 서 론

지하수 및 토양의 오염은 전 세계적으로 꾸준히 발생되고 있는 것으로 보고되고 있으며, 인체 및 생태계의 건강성을 위협하는 중요한 환경적 이슈이다. 장기간 지속되는 지중환경 오염을 관리하기 위해 각 국가에서는 오염 관리 체계를 수립하여 운영하고 있으며, 국내에서는 토양환경 보전법[시행 2020. 5. 27.] [법률 제16613호, 2019. 11. 26., 일부개정]와 지하수법[시행 2020. 12. 8.] [법률 제

17618호, 2020. 12. 8., 타법개정]에 의거하여 토양 및 지하수의 오염을 관리하고 있다. 현행 토양오염 관리 정책은 토양보전 기본계획을 기반으로 수립되며, 전국적인 토양오염의 추세 파악과 오염 우려지역의 관리를 위한 제도가 구축되어 있다.

토양오염 관리의 경우, 잠재오염 파악, 조사, 정화, 검증의 단계로 이루어진 토양오염 관리 체계에 따라 관리되는데, 토양오염 관리를 위한 조사는 상시측정, 토양오염실태조사, 토양정밀조사, 토양환경평가를 통해 시행될 수 있다. 토양오염 평가 제도에는 전국 토양의 관리 목적으로 시행하는 토양 환경(영향)평가와 함께 토양오염을 정화하려는 경우 시행하는 위해성평가가 있다. 오염 우려 지역을 대상으로 시행되는 토양환경조사는 2004년 이후 환경공단에서 토양 지하수 환경조사의 형태로, 토양과 지하수의 오염을 함께 조사하고 있으며, 방법 및 절차는 토양정밀조

주저자: 배민서, 석사과정

공저자: 김주희, 석사과정; 권만재, 교수; 조호영, 교수

교신저자: 이순재, 교수

*Email: soonjam@korea.ac.kr

Received : 2022. 06. 24 Reviewed : 2022. 07. 05

Accepted : 2022. 07. 22 Discussion until : 2022. 08. 31

사 지침을 준용하고 있다. 위해성평가(토양환경보전법 제 15조의5)는 토양오염을 정화하려는 경우 정화책임자가 시행하는 것으로서, 오염물질의 종류 및 오염도, 주변 환경, 장래의 토지이용계획과 그 밖에 필요한 사항을 고려하여 해당 부지의 토양오염물질이 인체와 환경에 미치는 위해의 정도를 평가하는 것으로 정의하고 있다.

최근 수립된 제2차 토양보전기본계획은 적절한 관리·보전으로 토양환경 건강성 증진을 목표로, 1) 토양오염 조사와 관련한 토양환경평가의 단계적 의무화, 2) 위해성평가의 내실화 및 생태위해성평가 도입에 관한 계획, 3) 지중환경 조사·정화·검증 체계 구축 추진, 4) 토양·지하수 통합 관리를 위한 법령 개편, 조사·조치 사후관리 등 통합추진의 내용을 기본계획 내에 포함하고 있다. 이와 같은 토양오염 관리 제도의 확대 및 토양·지하수 통합 관리의 필요성이 대두됨에 따라, 기존의 매체위주의 오염관리의 대안으로 토양 및 지하수를 포함하는 부지단위의 오염관리의 필요성이 부각되어 부지단위의 오염관리의 국내 도입에 대한 논의 및 연구가 진행된 바 있다. 제2차 토양보전기본계획 수립시 부지단위의 관리 필요성에 대해 숙의된 바 있으나 현실적으로 국내 개별법 관리체계에서 추진이 곤란함을 이유로 반영은 되지 않았다. 그러나 토양과 지하수의 오염의 연계 관리가 진행되는 2차 토양보전기본계획의 기조에서 지중환경오염 관리체계는 부지단위의 오염관리 체계의 도입 필요성과 유용성은 여전히 남아 있다.

미국, 독일, 일본 등의 국가에서 부지 단위의 오염관리 및 조사가 시행되고 있다. 미국의 경우 종합 환경 대응, 보상 및 책임에 관한 법률인 CERCLA(Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability Act)에서 Brownfield(US EPA)에서 개발이 완료된 부지/시설로서 환경오염으로 인해 활용이 중단되었거나 활용가치가 낮은 부지를 대상으로 오염관리를 수행하고 있다. 이들 국가에서는 부지 오염 조사 및 관리 단계에서 위해도 기반의 의사결정이 이루어지고 있다. 부지개념모델(Conceptual Site Model, CSM)은 오염부지 관리를 위한 의사결정 지원 도구로서 개발되었다. 부지개념모델은 오염부지에서 수행되는 조사를 기반으로 오염원, 오염경로, 수용체에 대한 해석의 결과로서, 단계적으로 진행되는 부지오염조사과정에서 획득된 최신의 조사 결과를 통해 개선되어 생생한 부지 정보를 이해하기 쉽도록 작성된다. 의사결정과정에서 부지개념모델은 조사의 미흡 사항을 확인하고, 후속 조사 계획을 수립하는데 사용될 수 있다. 이렇듯 부지개념모델은 오염부지 관리를 위한 핵심요소로써 많은 국가에

서 활발히 개발되고 있으며, 효율적 운영 및 제도 정착을 위한 노력이 진행 중이다. 현재 해외에서 사용하고 있는 부지개념모델의 활용과 오염부지 관리 제도는 토양오염물질 위해성평가 과정에서 부지개념모델은 평가대상지역 및 평가단위에 대한 오염특성 파악의 도구로 사용된다. 위해성평가서에서 부지개념모델의 적절성을 검토하는 것은 위해성평가 결과의 분석 과정 중 하나이다. 이러한 해외 활용 사례는 향후 국내에서 2차 토양보전기본계획에 따라 진행될 지중환경 오염 관리제도의 변화 방향성을 결정할 수 있는 중요한 자료가 될 것으로 생각한다. 부지단위 오염관리의 국내 도입에 따른 효용성을 예상하기 위해서는, 핵심 도구인 부지개념모델에 대한 이해와, 효용성에 대한 평가가 필요하다. 본 연구에서는 해외에서 사용되고 있는 부지개념모델의 정의와 작성/개선 방법에 대해 소개하고, 국내 지중환경 오염 관리 체계 내 도입 가능성에 대해 논하였다.

2. 부지개념모델의 정의

국내의 경우 부지개념모델은 환경부의 토양오염물질 위해성평가 지침에서 언급된다. 환경부는 부지개념모델을 대상부지 내 오염물질의 이동 및 노출경로, 수용체 등에 대한 현장 자료 및 평가 모식도라고 정의하고 있다. 부지개념모델은 부지의 환경 오염과 의사 결정에 관련된 주요 부지 정보 간의 관계에 대해 알려지거나 가정된 사항에 대한 종합적인 도표, 그림 및 서면 요약이다(NJDEP, 2019) 부지개념모델의 목표는 확인된 우려 오염물질의 범위와 수용체에 미치는 위험을 이해(위해도 평가)하기 위해 관련 부지 특징과 지표 및 지하 조건에 대한 설명을 제공하는 것으로서, “부지의 오염원과 수용체, 그리고 이들을 연결하는 완전한/잠재적 경로를 설명할 수 있는 자연적/인공적인 부지 환경에 대한 사용 가능한 정보의 통합적인 요약”으로 부지개념모델을 정의할 수 있다. 여기에서 오염원은 배출, 폐기물 또는 자연기원의 오염물질을 의미하며, 수용체는 인간과 생태학적 수용체를 포함하며, 부지 환경은 토양, 대기, 지하수, 지표수, 퇴적물 등의 매체를 포함하며, 경로는 오염의 이동 및 실제/잠재적 영향을 제어하는 물리적, 화학적 및 생물학적 과정을 포함한다(NJDEP, 2019).

2.1. 부지의 정의

해외에서는 ‘부지’를 토양/대수층이 오염된 지표/지중환경(Swartjes 2011)으로 정의하고 오염 관리의 대상으로

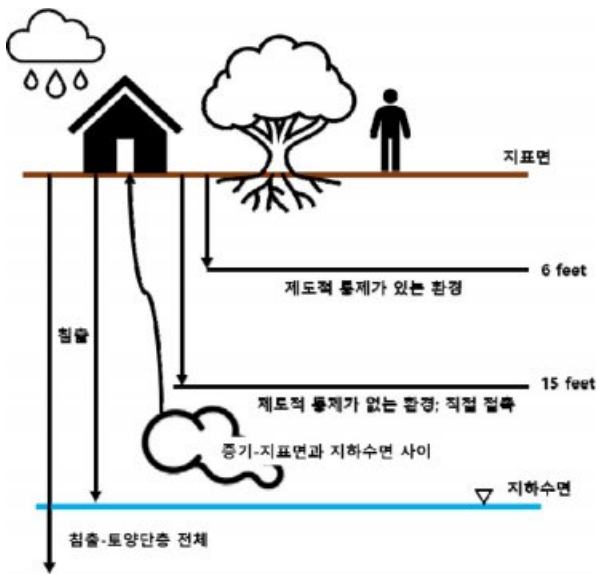


Fig. 1. Vertical profile of the subsurface environment for contaminated site definition (Yang et al., 2018).

하고 있다. 국내에서도 부지개념모델 작성을 위해서는 조사의 대상인 ‘부지’의 정의에 대한 합의가 우선되어야 하지만, 통용되는 명확한 정의가 없으므로 해외의 ‘부지’ 및 ‘오염부지’ 개념을 참고하여 국내에서 활용할 수 있는 ‘부지’의 정의를 제안하였다. 부지의 범위를 정의하기 위해서는 수평적인 범위와 수직적인 범위를 구분하는 것이 필요하다. 수직적 범위는 정화/관리기준이 충족되어야 하는 매체별 지점의 깊이까지를 포함해야하며, 이는 Fig. 1과 같이 미국 위싱턴주의 [유해폐기물 정화법(MTCA: Model Toxics Control Act)]를 기반으로 하여 오염물질의 확산 가능성, 수용체, 적용 가능한 위해저감조치에 따라 심도를 세분화할 수 있다. 토양의 섭취, 피부접촉과 같은 직접 노출경로에 대해서는 지표면 이하 15 feet(~4.6 m)까지, 지하수로의 확산을 고려했을 때는 지하수면 아래를 포함한 모든 심도까지, 휘발성 물질 흡입의 노출경로에 대해서는 지하수면까지가 부지의 수직적 범위가 될 수 있다.

수평적 범위는 해외 위해도 기반 부지 개념에서 확인된/잠재적 오염 영역, 오염물질, 그리고 오염 거동에 영향을 미치는 적합한 기작, 잠재적 수용체 묘사의 대상이 되는 지역으로 정한다(NJDEP, 2019). 국내에는 오염 발생자 책임 원칙에 의거해 오염부지를 소유하고 있는 사람에게 정화 등의 책임이 부과되기 때문에 오염 조사 및 정화시 대상 지역이 소유자에 따른 구획으로 국한 된다. 그러나 이런 경우 조사 대상 지역 경계 외곽에 오염원이나 이동 경로가 존재하는 경우가 생길 수 있어서, 위해도 기반의

부지 관리에서 정의하고 있는 부지와는 다른 의미를 갖게 된다. 지중환경에 대한 오염 조사 및 정화 관련 제도의 개선 과정에서 오염원 추적 및 오염 원인자 제거에 대한 과정이 추후 강조되게 되면 자연스럽게 조사 대상 지역으로서 부지의 개념은 위해도 기반의 부지 관리 개념까지 확대될 수 있을 것으로 생각된다.

2.2. 부지개념모델의 구성 요소

부지의 오염원, 거동경로 및 수용체에 대한 정보는 인간 건강과 환경에 대한 잠재적 위험을 평가(위해도 평가)하기 위한 부지개념모델을 구성하는 데에 필수적 요소이다. 2.2.1.~2.2.3.에서는 NJDEP(New Jersey Department of Environmental Protection)의 ‘Technical Guidance for Preparation and Submission of a Conceptual Site Model, 2019’를 참고하여 각 부지개념모델 구성 요소에 대해 소개하였다.

2.2.1. 오염원

오염원은 현재 및 과거의 현장 조건에 대한 이해를 바탕으로 잠재적 오염 활동을 식별하고 잠재적인 우려 대상 지역 및 오염물질을 결정을 통해 확인된다. 부지개념모델은 가능한 정확하게 오염원을 정의하고, 현장 및 외부에 대한 영향을 모두 고려하며 영향을 받았을 수 있는 환경 매체(예: 토양, 지하수, 지표수, 퇴적물)를 결정해야 한다. 잠재적 우려 오염물질의 식별과 부지 또는 그 주변 오염에 대한 가능성은 기 확인되었거나 잠재적 오염 활동의 시간 및 기간, 관련 화학물질의 사용 기간, 환경 매체 내에서 각 화학물질의 이동성 및 지속성과 같은 가능한 거동 등의 요소를 고려해야 한다.

2.2.2. 거동경로

거동경로는 이동경로와 노출경로로 구분할 수 있다. 문제가 되는 오염원의 경우 환경 매체로 오염물질을 방출하며 이 과정에서 오염물질의 자취를 이동경로라고 한다. 이동경로는 토양층을 통한 지하수로 오염물질의 침출, 하나의 대수층에서 다른 대수층으로의 하향 이동, 지하수를 통한 지표수로의 오염물질 이동, 지표수를 통한 오염물질의 이동, 토양/지하수에서 실내/실외 공기로의 오염물질 휘발 등이 포함될 수 있다. 인간 및 생태에 대한 위해성이 존재하는 경우는 잠재적 오염물질이 오염원에서 수용체로 이동할 수 있으며, 이와 같은 경로를 노출경로라고 한다. 노출 경로는 오염된 환경 매체와의 직접적 접촉(피부 노출), 오염된 환경 매체의 섭취, 오염된 매체에서 재배/사

육된 식품의 섭취, 오염된 매체의 흡입과 같은 경로들이 해당된다.

2.2.3. 수용체

수용체는 현재 및 미래 수용체를 모두 포함해야 하고 미래 수용체의 경우 실제 부지 개발 과정뿐만 아니라 부지의 향후 사용을 식별하고 수용체에 대한 향후 노출을 고려해야 한다. 잠재적 수용체의 식별은 부지개념모델의 핵심 기능이며 배출의 초기 발견 시 이루어져야 하며 조사가 진행됨에 따라 계속해서 개선되어야 한다. 수용체는 크게 인간 수용체와 생태 수용체로 대상을 나눌 수 있다. 인간 및 생태 수용체에는 조사 지역 내에 위치하거나 확인된 이동경로를 따라 존재하는 우려 오염물질에 의해 영향을 받거나 위협을 받는 것들이 포함된다. 인간 수용체의 예시로는 현재/미래의 부지 사용자(거주자, 방문자), 현장 및 외부 건설 작업자, 주변 거주지나 보호 구역 혹은 상업 및 산업 건물의 현재/미래 사용자, 음용/생활용수/농업용수 등을 위해 지하수를 이용하는 사용자 등이 있다. 생태 수용체는 주로 부지 내에 거주하거나 부지를 통해 이동할 수 있는 동식물들이 포함될 수 있다.

2.3. 형식 및 내용

부지개념모델은 Table 1과 Fig. 4에 제시된 것과 같이 표현하고자 하는 주제에 따라 적절한 형식으로 작성할 수 있다.

2.3.1. 서술적 부지개념모델

서술적 표현은 부지개념모델의 모든 부분을 그 당시 이해되는 부지에 대한 요약이다. 현장 조건, 오염 물질, 경로 및 수용체를 명확하게 설명해야 하며 데이터 격차 또는 불확실성에 대한 논의도 포함할 수 있다(NJDEP, 2019). 일반적으로 서술적 부지개념모델에는 부지 위치 및 영역, 지형, 지질/수문/수문지질, 부지의 이용과 소유권 및 활동 이력들, 민감한 수용체 위치와 부지로부터의 거리, 배출 특성 및 위치, 실제 혹은 추론된 특성 및 배출의 정도와 오염물질이 환경으로 이동하는 방식에 대해 알려진 것, 노출경로의 목록, 오염된 매체와 접촉할 수 있는

수용체의 목록 등의 항목들을 포함해야 한다. Fig. 2의 A를 통해 간단한 예시를 살펴볼 수 있다. 위와 같은 서술적 부지개념모델은 사전(Preliminary) 부지개념모델에 필요한 일반 정보를 간략하게 설명한다. 상세한 부지개념모델은 표 또는 그림 형식으로 더 잘 표현될 수 있다(NTEPA, 2013).

2.3.2. 표 부지개념모델

주로 오염원-거동경로-수용체와 관련된 부지 정보를 도표의 형식안에 채워 넣어 구축하는 형식의 부지개념모델이며 노출경로의 주제를 다룰 수 있는 형식이기도 하다. Fig. 2의 B에서는 오염원-거동경로-노출경로-수용체를 각 항목으로 구분하여 각 열에 알맞은 부지 정보를 기입하여 작성되었다.

2.3.3. 흐름도 부지개념모델

주로 오염물질의 거동 및 상 변화, 지중환경 내에서의 상호작용을 반영한 오염 양상 변화 및 흐름을 순서에 따라 표현하는 데 효율적인 방식이다. Fig. 2의 C1에서 이에 대한 예시를 확인할 수 있다. 또한 표 부지개념모델과 마찬가지로 오염원-경로-수용체나 노출경로에 관련된 정보들도 나타낼 수 있으며 이는 Fig. 2의 C2를 예로 들 수 있다.

2.3.4. 다이어그램 부지개념모델

그림의 형식에 가깝게 부지의 오염원, 거동경로, 수용체와 관련된 요소들을 하나의 다이어그램안에 표현하는 형식의 부지개념모델로, 특히 오염분포를 나타내는 데에 효과적이다. Fig. 2의 D1은 2011년 Darwin Harbour의 지역 보고표에서 발췌된 것으로, 수질에 영향을 미치는 주요한 과정을 간단한 다이어그램 형식으로 표현한 것이다. 자세한 조사 정보를 통해 보다 자세한 부지개념모델 개발이 가능하다. Fig. 2의 D2는 집수와 관련된 요소들을 포함하여 다이어그램의 형식으로 표현한 것이다.

2.3.5. 그림 부지개념모델

시각적 정보의 요약적 제시를 통해 오염부지 내 오염

Table 1. Contents and formats according to the topics of the conceptual site model

주제	내용	형식
오염원-경로-수용체	‘주요 경로 분석 체크리스트’ 작성을 통해 구축	표, 흐름도
운송 및 거동 과정	거동, 운송의 경로 정보에 초점을 맞춰 구축	흐름도
노출경로	생태에 노출될 수 있는 경로에 초점을 맞춰 구축	표, 흐름도
오염분포	종합적인 정보를 가지고 그림 형태 만들거나 서사 형태로 CSM을 구축	다이어그램, 그림



범위 및 분포에 대한 오염 상황을 직관적으로 파악할 수 있으며, 주로 2차원 또는 3차원의 표현을 통해 실제 오염 부지에 가까운 묘사를 수행할 수 있는 표현 방식이다. 특히 가상적 3차원 부지개념모델을 구축하는 경우 추후 수치적 계산을 통해 지중환경을 모사하고 오염 상황을 모델링하고 비교하는 데에 기반이 되는 자료로 활용할 수 있다. Fig. 2의 E는 NTEPA에서 제시한 그림 부지개념모델의 예다.

3. 부지개념모델 구축 방법

3.1. 구축 절차

부지개념모델의 구축 절차를 Fig. 3에서 요약하여 제시하였다.

3.2. 조사 정보 요약(Profiles)

오염의 시작 지점인 오염원과, 최종적인 오염 위해성의 대상이 되는 수용체, 그리고 그 사이에 지중환경에서 발

생하는 거동경로상 오염물질 반응 등의 부지개념모델에 포함되는 정보는 Profiles의 형태로 부지개념모델의 작성 과정에서 받아들인다(USACE 2012). 부지 조사 결과로 얻은 정보를 유형별로 구분하며(Table 2), 시설 및 부지 조사 결과정보 요약(Facility Profiles)은 인공적인 특징과 오염부지 부근의 잠재적 오염원을 나타내는 정보, 물리적 조사 결과(Physical Profiles)는 유출, Fate와 거동, 접근성에 영향을 미치는 자연적인 요인, 오염 유출/확산 조사 결과(Release Profiles)는 오염물질의 이동과 범위, 토지이용과 노출 조사 결과(Land use and Exposure Profiles)는 가능한 노출 시나리오, 수용체, 수용체 위치 등을 식별하고 평가하는 데 필요한 정보, 생태 및 문화적 자원 조사 결과(Ecological and Cultural Resources Profiles)는 현장 부근의 자연적 서식지나 생태계 수용체 정보를 포함한다.

3.3. 주요 경로 분석

부지개념모델을 정의하는 구성 요소인 오염원, 거동경로, 수용체에 대한 조사 정보 요약 자료를 기반으로 주요

조사 정보 요약 (Profiles)	조사 결과를 facility, physical, release, land use and exposure, ecological and cultural resources 중 해당하는 내용에 맞는 profiles로 분류해 요약한다.		
	시설 및 부지 (Facility profiles)	인공적인 특징과 오염부지 부근의 잠재적 오염원을 나타내는 정보	
	부지 특성 (Physical profiles)	유출, 운송과 거동에 영향을 미치는 자연적인 요인	
	오염 유출 및 확산 (Release profiles)	오염물질의 이동과 범위	
	토지 이용과 노출 특성 (Land use and exposure profiles)	가능한 노출 시나리오, 수용 종류체, 수용체의 위치 등을 식별하고 평가하는 데 필요한 정보	
	생태 및 문화적 자원 (Ecological and cultural resources profiles)	현장 부근의 자연적 서식지나 생태계 수용체	
주요 경로 분석	오염원-거동경로-수용체에 대한 경로 분석을 용이하게 하도록 돕는 부지개념모델 구축 도구로 체크리스트를 사용하여 수행한다.		
부지개념모델 작성	목적에 맞는 적절한 주제에 따라 다양한 방식으로 표현하는 부지개념모델을 작성한다.		
	주제	내용	형식
	오염원-경로-수용체	주요 경로 분석 체크리스트' 작성을 통해 구축	표, 흐름도
	운송 및 거동 과정	거동, 운송의 경로 정보에 초점을 맞춰 구축	흐름도
	노출경로	생태에 노출될 수 있는 경로에 초점을 맞춰 구축	표, 흐름도
	오염분포	종합적인 정보를 가지고 그림 형태로 만들거나 서사 형태로 CSM을 구축	다이어그램, 그림
부지개념모델 검토	부지개념모델 검토 체크리스트를 기입하고, 데이터 격차를 정리하고 해석한다.		

Fig. 3. Construction procedure of a conceptual site model.

Table 2. Main contents of the profiles for the construction of conceptual site model (USACE 2012)

Profiles 구분	주요 내용
시설 및 부지 정보 (Facility Profiles)	<ul style="list-style-type: none"> • 모든 구조물, 하수도 시스템, 공정 라인, 지하 유틸리티 • 물리적 경계(과거 및 현재), 울타리, 관리 통제 등 • 현재 및 과거 공정 및 제조 영역 • 운영 절차 및 이력 • 보관 및 폐기물 처리
부지 특성 (Physical Profiles)	<ul style="list-style-type: none"> • 지형 및 식물 특징 및 기타 자연 장벽 • 지표수 특징 및 배수로 • 토양 유형 및 특성을 포함한 지표 및 지하 지질 • 기상 데이터 • 지구 물리학 데이터 • 지하수 깊이 및 대수층 특성에 대한 수문 지질학적 데이터 • 현장 활동에 영향을 미치는 물리적 현장 요인 • 토양 천공 또는 관측점 로그 및 위치 • 지질 모델
오염 유출/확산 (Release Profiles)	<ul style="list-style-type: none"> • 오염원 영역에서 오염물질 이동의 측정 • 환경 오염물질의 화학적 특성(예: 용해도, 휘발성, 흡착 계수, 생물 농축 경향)을 포함하여 잠재적인 우려가 있는 오염물질 및 매체 • 운송 메커니즘에 대한 화학 혼합물 및 공존 폐기물의 영향 • 샘플링 위치와 함께 확인된 방출의 위치 및 묘사 • 거동경로 및 메커니즘 • 모델링 결과
토지이용과 노출 특성 (Landuse and Exposure Profiles)	<ul style="list-style-type: none"> • 현재 결정되었거나 합리적으로 예상되는 미래 토지 사용(예: 주거, 레크리에이션, 상업, 농업, 산업, 공공 산림) 및 근처 시설과 관련된 수용체 • 활동의 빈도 및 특성(침입 또는 비침입)을 포함하는 시설의 현재 또는 미래 활동 유형 • 구역 설정, 마스터 플랜, 공동체 이익 및 공향 근처의 안전 비행 구역 또는 소음 구역과 같은 정부 제한 사항 • 유익한 자원 결정(대수층 분류, 천연자원, 습지, 문화자원 등) • 자원 사용 위치(예: 물 공급 우물, 수영, 보트 타기 또는 낚시 등 레크리에이션 지역, 등산로, 목초지, 묘지) • 하위 집단 유형 및 위치를 포함한 인구 통계(예: 학교, 병원, 탁아소, 현장 작업자)
생태 및 문화적 자원 (Ecological and Cultural Resources Profiles)	<ul style="list-style-type: none"> • 서식지 유형(습지, 숲, 사막, 연못 등), 양 및 질을 포함한 시설 환경 설명 • 해당 지역의 주요 용도 및 방해 정도(있는 경우) • 서식지 유형(멸종 또는 위협받는 종, 철새, 어류 등)과 관련된 생태학적 수용체 식별 • 잠재적 서식지 지역에 대한 유출과의 관계(위치, 우려 오염물질, 샘플링 데이터, 이동경로 등)

경로를 분석한다. Fig. 4는 LNAPL 오염부지를 대상으로 활용 가능한 부지개념모델 주요 경로 분석을 위한 ‘ITRC, TPH Risk Evaluation at Petroleum-Contaminated Sites (TPHRisk-1), 2018’의 체크리스트로, 국내 환경영향평가법의 수용체 항목을 반영하여 다음과 같이 제시하였다.

3.4. 부지개념모델 작성

부지개념모델은 의사 결정에 중요한 현장 문제를 효과적으로 나타낼 수 있는 여러 형식 중 하나 또는 하나 이상을 조합하여 사용할 수 있다. 형식은 일반적으로 목표한 의사 결정 내용에 따라 결정하며, 2.3에서 언급한 바와 같이 대표적으로 서술, 그림, 흐름도, 표, 다이어그램 중 한 개 이상의 조합을 사용할 수 있다. 오염 특성 및 정도 등을 비롯한 오염원에 대한 이해가 이루어지고 난 다음에는 해당 오염물질의 수용체로의 이동 및 거동을 평가해야 하므로, 이러한 흐름에 따라 주로 표현하고자 하

는 대상의 초점을 조금씩 변화하여 적용시킨 부지개념모델을 작성한다. 기본적인 부지개념모델로서 기본 구성 요소인 오염원-거동경로-수용체에 초점을 두어 주요 경로에 대한 내용을 담은 부지개념모델을 구축할 수 있다. 부지 특성화에 주목한 부지개념모델 작성의 경우, 지중 환경 내 오염물질의 운명 및 거동에 관하여 주로 지질매체 또는 지하수를 통해서 어떻게 오염원으로부터 운송되고 상 변화 등의 상호작용을 일으키는지에 대한 내용을 포함한다. 부지개념모델은 부지특성화뿐만 아니라 위해성평가를 목적으로도 작성된다. 위해성평가의 경우 인체 및 생태 위해성평가가 시행되며, 이 경우 목적에 따라서 노출경로를 보다 구체적으로 설명하여 인간 및 생태계에 구체적으로 어떠한 경로를 통해 노출되며 위해성을 발생시키는지 파악할 수 있도록 한다. 이렇게 다양한 목적을 위해 작성되는 부지개념모델은 포함하는 자료의 양과 종류, 오염부지의 복잡성에 따라 가장 효율적인 형식을 활용하는 것이

유출 위치 —저장소로부터 방류/유출되는 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 type="checkbox"/> 기타/미확인	
<input type="checkbox"/> 자유상 NAPL 오염원	
<input 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 type="checkbox"/> 지표수의 흐름에 의한 기름의 수평적 유동 (강우 혹은 계절적 물의 흐름) <input type="checkbox"/> 조석순환 중 기름의 수평적 유동	
취발에 의한 운송	
<input type="checkbox"/> 지표에서 기름의 증기 발생	
인간 수용체 경로	
<input type="checkbox"/> 지표에서 기름에 접촉 노출 <input type="checkbox"/> 기름의 증기 흡입	
잠재적 생태 수용체	
<input type="checkbox"/> 식물상 및 식생 (육상, 수중) <input type="checkbox"/> 육상동물상 (곤충, 육상무척추동물, 양서류, 조류, 포유류) <input type="checkbox"/> 육수생물상 (오류, 저서성대형무척추동물, 동식물플랑크톤)	
지표수 퇴적물	<input type="checkbox"/> 담수 <input type="checkbox"/> 기수 (해수와 담수가 혼합된 곳의 물) <input type="checkbox"/> 해수
<input type="checkbox"/> 흐르지 않는 지표수 (연못, 호수, 기타) <input type="checkbox"/> 연속적으로 흐르는 지표수 (하천, 강, 기타) <input type="checkbox"/> 조수의 영향을 받는 지표수 <input type="checkbox"/> 계절에 따라 존재하는 (임시) 지표수	
이류/분산에 의한 운송 (WATER-DRIVEN FLOW)	
<input type="checkbox"/> 지표수 위의 기름 혹은 Sheen의 움직임	
인간 수용체 경로	
<input type="checkbox"/> 물/퇴적물 중의 기름에 대한 접촉 노출 <input type="checkbox"/> 식물 (표면)의 기름에 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	
<input type="checkbox"/> 기름의 지표와 지하수면 사이의 수직적 유동	
GRAVITY-DRIVEN FLOW에 의한 운송	
<input type="checkbox"/> 비포화 토양으로 기름 누출	
WATER-DRIVEN FLOW에 의한 운송	
<input type="checkbox"/> 하향의 빗물 침투를 통한 기름 번짐 현상 (Smearing) <input type="checkbox"/> 일시적 수직 변동으로 인해 지하수면 경계에서 비포화 토양으로의 기름 번짐 현상 (Smearing)	
인간 수용체 경로	
<input type="checkbox"/> 토양 중의 기름에 대한 접촉 노출	
잠재적 생태 수용체	
<input type="checkbox"/> 표면이나 뿌리영역에 기름이 있는 경우가 아니면 식물에 적용할 수 없음; 지표의 경우를 참조 <input type="checkbox"/> 굴을 파는 동물	
지하수 포화대	
<input 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 type="checkbox"/> 지하수면에서 일시적인 수직적 출렁임과 수리경사에 의한 기름의 수평적 유동	
인간 수용체 경로	
<input type="checkbox"/> 추출된 지하수의 기름에 대한 접촉/섭취 노출	

Fig. 4. Checklist for pathway analysis of LNAPL contaminated sites (ITRC, 2018).

잠재적 생태 수용체
<input type="checkbox"/> 뿌리영역에 기름이 있는 경우가 아니면 식물에 적용할 수 없음; 지표의 경우를 참조
<input type="checkbox"/> 잔류상 NAPL 오염원
지표 토양
<input type="checkbox"/> 토양에 잔류된 염화유기용제 (중화되고, 농도가 낮을 가능성이 높음)
직접 노출에 의한 운송
<input type="checkbox"/> No transport driver
인간 수용체 경로
<input type="checkbox"/> 얇은 토양의 잔류 기름에 대한 접촉, 우발적 섭취 및 흡입 노출
<input type="checkbox"/> 농작물—뿌리 채소의 섭취
생태 수용체
<input type="checkbox"/> 영향받은 식물(죽거나 스트레스받음)
<input type="checkbox"/> 퇴화된 토양질(기름으로 뒤덮인 토양)
비포화 토양
<input type="checkbox"/> 토양 내 잔류 기름(중화되고, 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 기름의 하향 유동
인간 수용체 경로
<input type="checkbox"/> 증기를 통한 섭취 노출
생태 수용체
<input type="checkbox"/> 굴을 파는 동물
지하수면의 토양
<input type="checkbox"/> 토양 내 잔류 기름(중화되고, 농도가 낮을 가능성이 높음)
용해에 의한 운송(WATER-DRIVEN FLOW)
<input type="checkbox"/> 용해성 기름 성분이 물에 용해
<input type="checkbox"/> 지하수 플룸으로서 용해된 기름 성분의 수평적 운송
인간 수용체 경로
<input type="checkbox"/> 추출된 지하수에서 용해성 기름 성분에 대한 접촉 및 섭취 노출 (천부 우물들의 경우만; 담수의 경우만)
<input type="checkbox"/> 굴착 중 지하 토양과 접촉 노출
생태 수용체
<input type="checkbox"/> 기름이 뿌리 영역에 있지 않으면 적용할 수 없음; 지표 토양의 경우를 참조
퇴적물 및 하천 주변 침전물의 영역
<input type="checkbox"/> 퇴적물 내 잔류 기름(중화되고, 농도가 낮을 가능성이 높음)
용해에 의한 운송
<input type="checkbox"/> 용해성 기름 성분이 물에 용해
인간 수용체 경로
<input type="checkbox"/> 퇴적물에 대한 접촉 노출
<input type="checkbox"/> 어류 섭취
생태 수용체
<input type="checkbox"/> 식물상 및 식생(육상, 수중)
<input type="checkbox"/> 육상동물상(곤충, 육상무척추동물, 양서류, 조류, 포유류)
<input type="checkbox"/> 육수생물상(오류, 저서성대형무척추동물, 동식물플랑크톤)

Fig. 4. continued

좋다(NJDEP, 2019). 부지개념모델이 표현하는 내용 및 복잡성은 프로젝트의 수명 주기에 따라 변화하기 때문에 그 과정에서 개선되는 내용에 해당하는 내용이 있다면 추후 개선된 형태의 부지개념모델들을 구성할 필요가 있다(NJDEP, 2019).

3.5. 부지개념모델 검토

부지개념모델 작성 후 해당 부지개념모델 수준에서 요구되는 필수 요소들이 충분히 반영되었는지의 여부에 대한 검토를 수행한다. 데이터 격차(Data gap) 해석은 부지개념모델의 검토를 위해 활용될 수 있으며, 이는 부지관리 단계별로 시행되는 조사목적에 따라 그 기준으로 삼을

Table 3. Checklist for constructing conceptual site model during remedial process (NJDEP, 2019)

평가 항목	
1	오염 유출 지점
	/물질
	/예상 부피
	/발견 날짜
	오염원, 경로, 수용체 정보
	초기 시정 조치
	영향받는 매체 요약
부지 특성과 오염 지역(Areas of concern, AOCs)을 설명하는 부지 지도 등의 자료 첨부	
2	부지개념모델 범위 설명
	오염물질 (COCs)
	토양 내 오염물질
	지하수 내 오염물질
	증기상의 오염물질
	소수성 액체
	잠재적 이동경로와 정화 규제 목표 (인간 건강 및 생태)
	토양
	지하수
	지표수
	증기(토양증기/실내공기)
	공기 중(에어본)
	기타 (적용 가능한 경우)
	민감한 수용체
	지역적 지하수 지정 또는 사용
	#주거용 우물 (부지로부터 거리/방향)
	#공공 우물 (부지로부터 거리/방향)
	지표수체 (부지로부터 거리/방향)
	공동 사회 수자원-지표수 섭취
	주거용 건물
	200ft 이내의 모든 공공 이용 공간 확인
	사용 가능한 정보 요약
	과거와 현재의 부지 이용/상태
	부지 & 인접 지역 특성 활용/용도 규정
	부지
	북쪽 근접지
	동쪽 근접지
	남쪽 근접지
	서쪽 근접지
	지하 시설/바닥부(invert)까지 깊이
	토양
	암상
	지하수 심도
	Smear 영역
	기반암 심도
	이질성
	지표수 습지까지 근접성
	토양 덮개
	건물까지 근접성
	시설물/선호 경로
	지하수
	지하수 흐름

Table 3. continued

평가 항목	
2	수리경사 공극률/투수율 투수계수 수리적 영향 반경 함양, 배수 지역의 위치 시설(Utilities)/우선적 경로(preferential pathways) 양수 영향 위치 지표수 스트레스 받은 식생/스며들(seeps)/광택(sheen) 변색된 토양/퇴적물 과거 생태학적 결론 지하수 흐름 지표수 기준을 초과하는 지하수 COCs 배경 오염의 존재 증기 (토양 증기/실내 공기) 건물로부터 30ft 이내의 스크리닝 수준을 초과하는 지하수 건물로부터 100ft 이내에 있는 자유상 물질(free product) (현재 혹은 이력) 건물로부터 100ft 이내에 있는 비유류 화합물 현재 스크리닝 수준을 초과하지 않는 지하수 COCs의 과거 수준이 증기침입 문제를 야기할 수 있는가? 지하실/기름통(sump)의 존재 현재 건물의 이용 지하 바닥/슬래브의 상태 지하실이나 기름통(sump)에 지하수나 자유상 물질(free product)의 존재 부지 또는 그 근처에 위치하는 매립지 적용가능한 스크리닝 수준을 초과하는 토양가스 혹은 실내 공기 영향 메탄 생성 환경의 존재 기타 확인된 위험 (ex. 악취) 조사 지역의 완전한 범위 내의 인간과 생태 수용체 확인 토양, 지표수, 퇴적물에 있는 COCs 현재와 미래에 노출돼 있는 종류 환경적 민감지역(ESAs) 각 이동경로를 따라서 노출된 인원 ESAs로 이끄는 이동경로 노출경로(인간) 현재 또는 잠재적 노출가능 인원
	모든 관련 사진, 지형도, 지질도 등 첨부
3	정화 선택 취해진 정화 조치 정화 지역 정화 효율 정화 조치 결과(Remediation Action Outcome, RAO) RAO 정당화 RAO 이후 모니터링 계획 제외 영역 길이/기간 구분(적용가능한 경우) 변화 첨부자료 부지 위치도, 지역 지도, 부지 지도, 토양 데이터 지도, 정수압면 지도(지하수위 등고선도), 지하수질 데이터지도, 토양 시추공, 관정 설치 개략도, 지질 단면도, 음용 관정 반경도, 토양 데이터 도표, 지하수 상황 이력 도표, 수문도, 지하수 플룸 모델, 정화 시스템 레이아웃, 과정 & 계획 다이어그램

수 있다. 부지개념모델의 완전성에 대한 검토를 주기적으로 수행하면 데이터 격차(Data Gap)을 보다 쉽게 식별할 수 있으며, 궁극적으로는 식별한 데이터 갭을 통해 후속 조치를 판단하거나, 부지개념모델을 개선함으로써(잠재적) 영향을 받을 수 있는 수용체를 효과적으로 처리하고 보호하기 위한 정화 결정을 내릴 수 있다(NJDEP, 2019). Table 3의 “New Jersey Department of Environmental Protection, Technical Guidance for Preparation and Submission of a Conceptual Site Model, Version 1.1”에서는 정화설계 단계에서 조사자가 부지개념모델을 검토하는 데 도움을 주기 위해 포함될 수 있는 정보 유형을 확인하는 체크리스트를 제공한다. 구축한 부지개념모델을 기반으로 체크리스트의 항목들을 기입하면 정화설계 조사 단계에서의 정보 부재로 인해 빈칸으로 남게 되는 부분이 생김과 이처럼 기입되지 못한 부분이 데이터 격차이다. 부지개념모델의 profile별 요구수준과 비교하여 불확실하거나 부족하다고 판단되는 정보들을 데이터 격차로 판단하고 이를 해소하기 위한 조사방법들을 권장사항(Recommendation)으로 제시할 수 있다.

4. 부지개념모델 개선

4.1. 오염부지 관리 단계

오염부지 관리의 단계적 목적은 오염 개연성 조사, 오염 여부 확인(확인용 시료채취 및 분석), 오염범위/오염량 산정 및 정화비용 개략적 산정, 복원 대안 수립 및 복원 목표 설정으로, 여러 국가 및 오염부지 관리 체계 내에서 공통적이다(USEPA 2011). 일반적으로 오염부지 관리 단계의 구성은 목적에 따라 부지 평가(Site assessment)-부지 조사(Site investigation and alternatives evaluation)-정화 방법 선택(Remedy selection)-정화 시행(Remedy implementation)-정화 후 활동(Post-construction activities)-부지 관리 완료(Site completion) 따르며(USEPA 2011), Fig. 5과 같이 국가 및 체계에 따라서 세부 절차는 조금씩 다르게 반영한다. 해외에서는 토양오염에 대한 인식 수준이 높아 오염부지 관리를 위한 부지이력제도 등을 포함한 사전 토양오염조사체도가 활성화되어 있는데, 특히 미국, 독일 등 국가들은 오염부지 관리를 위한 부지이력제도의 시행을 위해 법적 근거와 자료를 데이터베이스화하여 관리할 수 있는 정보시스템이 도입되어 있는 수준이다.

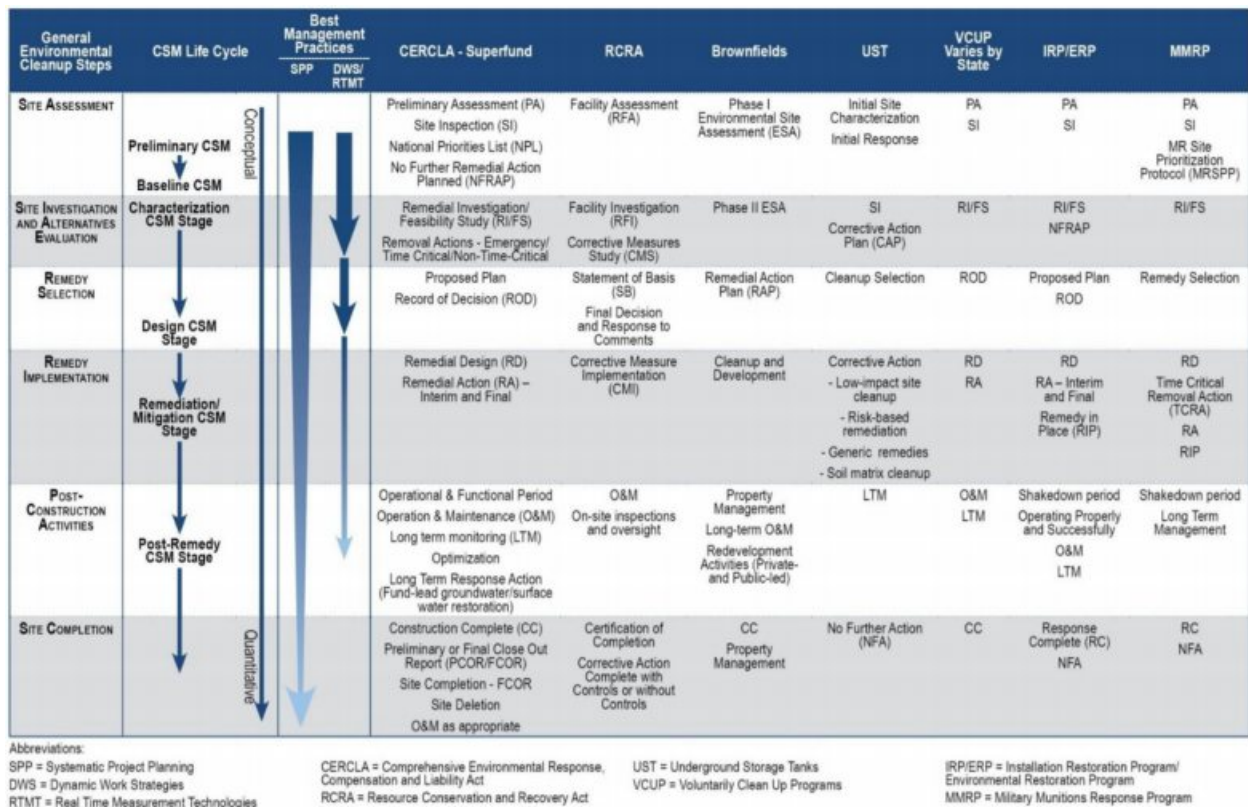


Fig. 5. Various contaminated site management systems (USEPA 2011).

4.2. 오염부지 관리 단계별 부지개념모델의 종류

일반적인 오염 관리 및 조사 단계(USEPA 2011)에 대응되는 부지개념모델이 단계별 목적 및 정보량에 따라 변화한다. 부지 평가 단계에서 비교적 적은 조사 항목에 대한 결과를 종합하여 단순하게 작성한 오염부지 개념적 묘사에서 시작하여, 추가적인 조사가 수행됨에 따라 점점 더 구체화된 개념적 묘사로 이어지고, 이후 부지 관리 완료 단계에 다다르면 부지에 대한 정량적인 부지모델 수준의 부지개념모델을 구축할 수 있는 기반을 마련할 수 있다. 이 때, 부지개념모델은 정량적 부지모델과 혼동하지 않아야 한다. 부지개념모델에 반영하는 수치들은 부지에서 측정 결과 얻은 단순한 지리적, 물리적 특성값(깊이, 두께, 거리, 투수성, 수리경사, 농도 등)인 반면에 정량적 부지모델에서는 이러한 특성 값을 이용해 수치적으로 계산한 결과 얻은 작용과 속도 등을 수치로 반영한다(McLane Environmental, 2018). 이러한 부지모델은 부지개념모델에서처럼 조사 내용이 추가됨에 따라 더욱 정밀한 부지모델로 개선될 수 있다(NAVFAC 2017).

1) 사전 CSM(Preliminary CSM): 부지의 전반적인 검토를 위해 기존의 정보를 엮는 시작점이 되는 부지개념모델이다. 기존 정보 양에 따라 사전 CSM의 복잡성이 결정되는데, 주로 부지 소지자와 이해관계자 인터뷰, 과거 또는 현재의(수리)지질학적 정보, 그 이외의 정보(항공 사진, 전자 환경 데이터베이스, 소유 세금 지도 등의 정보를 포함한다.

2) 기초 CSM(Baseline CSM): 사전 CSM의 조사 항목 데이터갭 및 프로젝트 목적 달성을 위해 필요한 주요 정보를 식별하는 부지개념모델이다. 사전 CSM보다 개선된 보다 많은 정보를 소개하며, 부지 상태에 대한 이해관계자의 합의(또는 불합의), 불확실성 가설, 데이터갭/필요 수집 계획, 잠재적 정화 수행 등의 정보를 통합하여 데이터 종류, 밀도, 품질을 확인할 수 있다.

3) 정밀 CSM(Characterization CSM): 부지 묘사를 위해 조사한 결과를 통합한 부지개념모델이다. 부지 특성화 작업 중에 생성된 데이터를 효율적으로 수집하여 종합하는 데 사용한다. 업데이트되는 데이터를 기반으로 오염의 성질 및 범위, 거동 등을 제어하는 주요 지질학적/수문학적 특징에 관한 이해관계자의 불확실성을 식별/관리하는 데 유용하다.

4) 정화설계 CSM(Design CSM): 정화를 설계하는 단계의 부지개념모델이다. 추가 정보 요구 사항을 파악하고 선택한 정화 기법이 구현되도록 지원하는 데이터를 종합한다. 물리적 특성 데이터, 지질 및 수문 지질학적 조건

또는 오염물질 농도 및 분포를 개선하여 정화 설계를 최적화할 수 있다. 정밀 CSM은 일반적으로 부지 특성화 작업 중에 사용된 것과 동일한 데이터 관리 및 3D 도구를 사용하여 구축할 수 있다. 농도 범위, 질량 추정치, 위치 및 오염원 범위 같은 요소는 초기 방향성을 설정하는데 도움이 될 뿐만 아니라 단기, 중기 및 장기 측정 기준을 설정하여 정화 기법/시스템 성능을 측정하고 평가할 수 있다.

5) 정화/완화 CSM(Remediation/Mitigation CSM): 정화 시행 중 사용하는 부지개념모델이다. 굴착 활동 지지 및 문서화, 단계적 정화 프로그램의 관리, 부지의 운영 단위/하위 단위별 정화 관리, 현장에서 변화된 상황에 대한 대응, in-situ 및 ex-situ 정화 시행 최적화에 활용될 수 있다. 또한 운영 및 유지 보수 및 장기 모니터링 활동을 포함하며, 지속적인 부지개념모델 업데이트를 통해 이해관계자의 합의를 얻고, 정화/완화 과정에서의 잠재적인 어려움을 확인하며, 추후 정화 최적화를 지원할 수 있다. 이전 CSM 단계에서 사용된 것과 동일한 CSM 플랫폼 및 데이터 관리 시스템을 기반으로 정화/완화 CSM을 구축함으로써 프로젝트 팀은 상당한 비용을 절감할 수 있다는 장점이 있다.

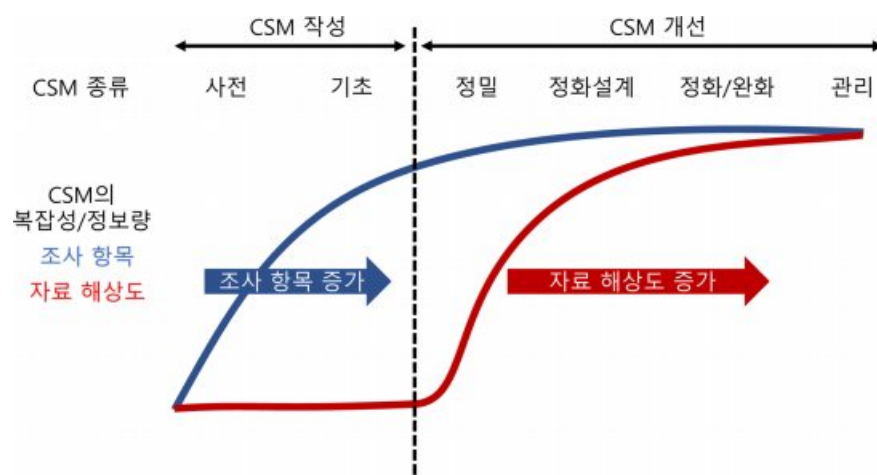
6) 관리 CSM(Post Remedy CSM): 정화 완료 후 다양한 문서화 및 재개발 계획 요구 사항을 지원할 수 있도록 통합 및 종합 정보를 제공하는 부지개념모델이다. 정화 목표를 달성하는 현장의 개선 효과와 성과를 프로그램 방식으로 평가하기 위해 통계적 기반을 가진다. 오염부지 정화 성공과 관련하여 확인된 최상의 관리 및 기술을 문서화하고 활용한다. 부지 개선 활동 문서화, 잔여 폐기물의 위치, 치수 및 농도; 제도적/공학적 통제; 지질/수문 지질학적 부지 조건과 주요 부지의 물리적 또는 화학적 특징에 대한 자세한 이해를 제공하여 부지 재사용 계획을 용이하게 한다.

국내의 오염 관리 체계에 따른 단계적 부지개념모델 작성 및 개선을 고려하기 위해, Table 4와 같이 각 조사 단계를 목적에 따라 구분하고 확인이 필요한 정보를 profiles 유형에 따라 세분화하여 해외의 오염 관리 체계와 같이 정리하였다. 해외의 오염부지 관리 체계에 대응시킬 때, 부지개념모델 활용 측면에서 주목해야 할 단계는 부지 평가(Site assessment)에 대응하는 실태조사, 부지 조사(Site investigation and alternatives evaluation) 및 정화 방법 선택(Remedy selection)에 대응하는 토양정밀 조사이다. 실태조사의 결과를 이용해 사전 CSM을 구축하며 이는 해외의 사전 CSM과 거의 비슷한 수준의 내용을

Table 4. 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
정밀조사	기초조사	●	△	O	△	△	오염물질
	개황조사	●	O	●	△	△	오염 범위
	상세조사	●	●	●	△	△	오염 양, 거동
위해성 평가	인체위해성 CSM	●	●	●	●	△	위해성
	생태 위해성 평가	●	●	●	●	●	생태위해성

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

**Fig. 6.** Changes in survey information during the preparation and improvement of the conceptual site model.

포함한다. 토양정밀조사 내 기초조사를 통해 구축하는 기초 CSM은 해외의 기초 CSM에 대응할 수 있으며, 상세조사를 통해 구축하는 정밀 CSM 또한 해외의 정밀 CSM에 대응할 수 있다. 개황조사를 통해 구축하는 개황 CSM의 경우, 해외 조사 단계와 명확히 일치하는 단계가 없어 기초 CSM과 정밀 CSM 중간 단계에 해당하는 수준의 조사 항목 및 구체성을 가지는 조사 결과를 이용해 구축할 수 있다.

부지개념모델은 Fig. 6과 같이 1) 조사 항목을 증가하여 부지개념모델을 작성/개선하는 단계와, 2) 자료 해상도를 증가시켜 부지개념모델을 개선하는 단계로 구분할 수 있다. 조사 항목을 증가하며 작성/개선하는 부지개념모델의 경우, 작성 및 활용 초기 단계에 해당하는 사전 CSM과 기초 CSM이 있다. 자료 해상도 보충 방식의 부지개념모델 개선은 기존의 조사 항목에 해당하는 결과 내에서

향상된 정확도, 정밀도 등의 데이터 품질을 업데이트하는 방식으로 CSM을 개선하며, 개황 CSM, 정밀 CSM, 정화/완화 CSM, 관리 CSM이 있다.

4.3. 오염부지 관리 단계별 부지개념모델 개선 사례

부지개념모델 개선은 오염부지 관리 체계 내에서 조사 단계별, 또는 하나의 조사 단계 내에서 추가적인 조사 결과가 업데이트됨에 따라 수행될 수 있다. Fig. 7은 국내 부지 정밀 조사 단계에 해당하는 CERCLA 부지 조사 단계 내에서 구득한 조사 결과의 보완 사항을 부지개념모델의 개선에 반영한 사례이다.

Fig. 8은 오염부지 관리 단계별 부지개념모델의 개선 사례이다. 초기의 개념적인 표현에서 조사가 진행되는 과정에서 점차 정량적이고 정밀한 정보가 추가 및 보완되는 것을 확인할 수 있다.

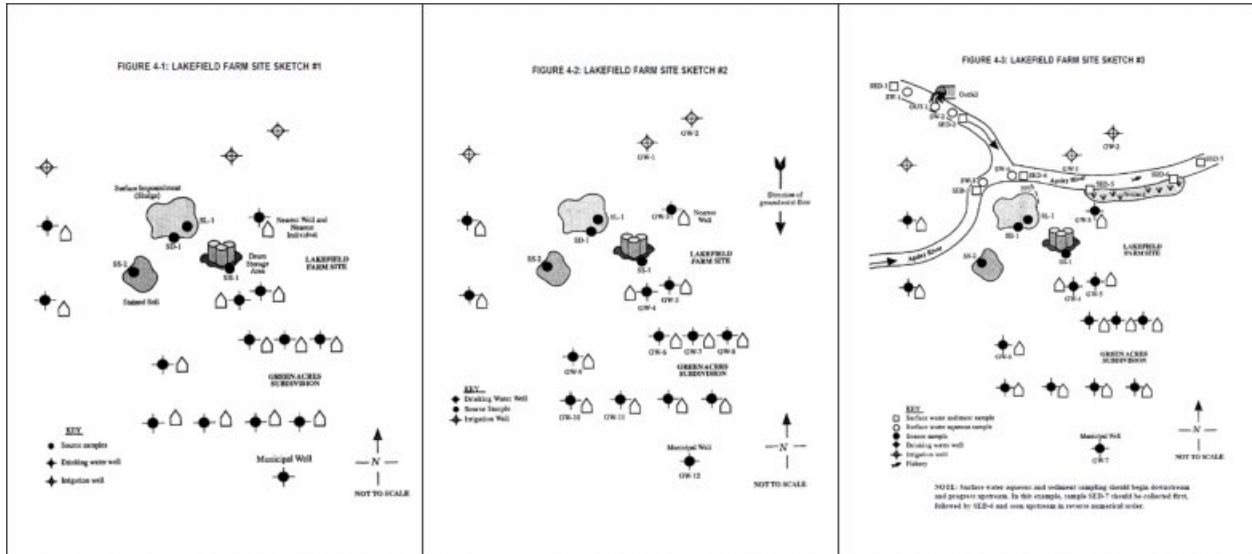
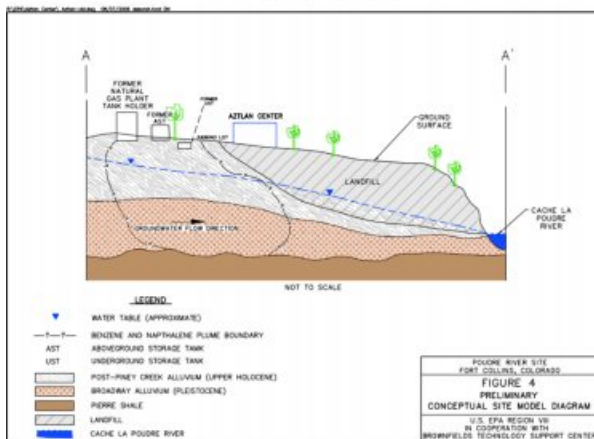
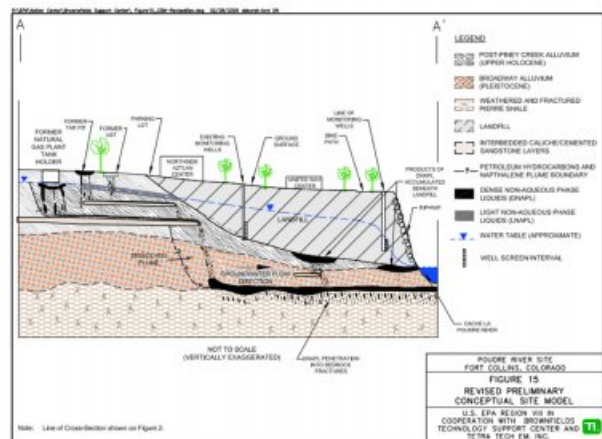


Fig. 7. Conceptual site model enhancements in the site investigation stages.

▼ 사전 CSM



▼ 개선된 사전 CSM



▼ 정밀 CSM

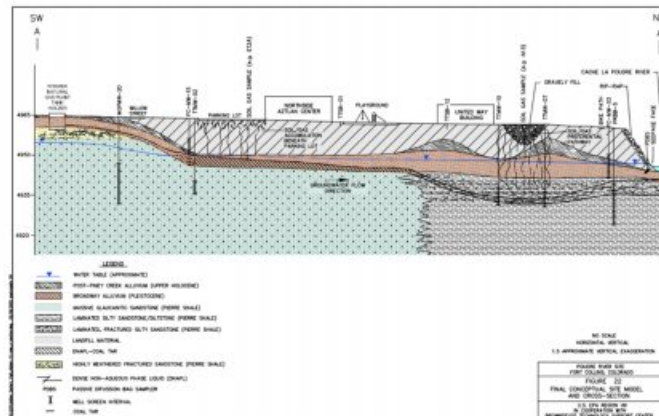


Fig. 8. Conceptual site model enhancements according to the stages of the contaminated site management (USEPA 2006).

5. 토양오염 정밀조사 기반의 부지개념모델 작성 제안

5.1. 현행 오염부지 관리 체계

우리나라는 수질, 대기 등 타 매체에 비해 법제화는 다소 늦었지만, 1995년 토양환경보전을 위한 ‘토양환경보전법’을 입법하여 토양환경 보전 및 오염관리를 위한 기본 토대를 마련하였다. 하지만 1996년 1월 법이 시행된 이후 약 20년 동안 지속적인 법 개정을 추진해 왔으나, 미국 등과 달리 오염물질의 우려 및 대책기준을 특정하고 법적인 기준에 따라 일률적인 정화를 원칙으로 하고 있다. 이러한 경직된 정화책임체제로 인해 인체 위해성 및 부지 특성 등을 고려한 합리적이고 효율적인 토양오염관리에 한계가 있다. 국가별로 운영되고 있는 지중환경 오염 관리 체계는 관리 대상, 위해도 고려 여부, 부지개념모델 활용 여부를 기준으로 차별성을 보인다. 미국을 포함한 해외국가의 오염부지 관리 체계에서는 오염부지를 대상으로 위해도에 기반한 의사결정과정에 부지개념모델을 활용하고 있다. 우리나라의 경우, 부지 중심의 오염 관리가 아닌 토양/지하수/폐기물 등 매체를 대상으로 관리가 시행중이며, 위해도 평가는 제한적으로 시행하고 있다.

5.2. 현행 정밀조사 주요 결과 보고 사항

토양정밀조사지침(환경부고시 제 2009-181호, 2009.8.25., 제정)에 따르면 조사절차는 기초조사-개황조사-정밀조사를 따르며, 그 결과는 토양정밀조사결과보고 형식에 맞추어 보고해야 한다. 결과 보고 시 포함되어야 할 주요

내용은 다음과 같다.

- 주변지역의 실태(거주인구, 가구 수, 농경지 현황 등)를 요약기술
- 오염원으로 나타난 시설의 규모(종류, 발생량, 적치량, 용량 등)와 위치를 지도(A4)에 표시
- 토양오염도 조사결과는 오염원으로부터 이격거리별로 오염분포도 제시 {이격거리, 오염도(평균, 최고, 최저)등}
- 토양, 수질, 폐기물, 대기질, 수로저질 등에 대해서는 조사지점별, 깊이별, 항목별로 일목요연하게 정리하여 제시
- 굴착 및 시료채취 등의 현장 작업사진과 시료채취 지점도(토양, 지하수 등) 등 조사관련 자료 첨부
- 정밀조사를 일부 조정하여 실시한 경우 그 구체적인 사유를 기재하고 이를 증명할 수 있는 자료를 첨부
- 조사지역에 암반층이 있을 경우 이를 확인할 수 있는 자료(사진 등)를 첨부하여야 함

5.3. 현행 토양오염 정밀조사 결과 보고서와 개선안

현행 토양오염 관리 체계 내 정밀조사 이후에 토양을 대상으로 한 매체 중심의 조사 결과 보고를 수행한다. 오염원-거동경로-수용체로 구분하여 오염조사를 진행하고 있지 않기 때문에 부지개념모델 작성 시 활용하는 CSM 작성 체크리스트의 형태로 현행 정밀조사 결과를 보고하는데 한계가 있다. 현행법 상의 토양정밀조사와 지하수 정밀조사의 매체별 조사 방식 및 체계를 빠른 시일 내에 전면적으로 오염부지 관리 체계에 따른 부지개념모델 작성 방식으로 바꾸는 데에도 어려움이 있으므로 점진적인 개선이 필요하므로 다음과 같이 결과 보고 개선안을 제시하였다.

현재 토양오염 정밀조사 결과 보고서	
1) 조사 목적	
2) 조사 내용	
A. 조사대상 지역	
B. 조사기간	
C. 시료채취현황: 토양(표토, 심토 등), 수질(하천수, 지하수 등), 폐기물(광미 등), 대기질 등의 시료를 조사대상 종류별로 구분하고 지번, 면적, 토지용도를 보고한다.	
D. 조사항목	
3) 토양정밀조사결과 및 종합의견	
A. 조사지역 개황	
B. 조사결과 및 분석	
i. 시료채취 현황별 오염도 조사결과	
ii. 토양, 광미 및 하천수 등 오염도조사결과 현황	
iii. 오염토양 정화대상량 산정 제시(오염물질 종류별 대상량을 제시)	
iv. 조사결과 분석	
C. 대책 방안	
i. 구체적인 토양오염방지 및 정화대책 제시: 토양 등의 오염범위, 오염정도 등을 감안하여 대상지역의 토양오염 방지사업을 위한 사업 추진 필요성과 구체적인 방법	
ii. 오염토양의 정화방법 등 정화대책 제시: 조사지역의 지형, 지질 등 입지상태와 오염물질의 종류 및 오염도 등을 고려하여 기술적으로 적용가능한 오염토양 정화방법 등	

현재 토양오염 정밀조사 결과 보고서	
4) 향후 대책계획	A. 오염토양 관리 및 정화를 위한 계획 및 대책 제시
토양오염 정밀조사 결과 보고서 개선안	
1) 조사 목적	
2) 조사 내용	A. 조사대상 지역 B. 조사기간 C. 시료채취현황: 토양(표토, 심토 등), 수질(하천수, 지하수 등), 폐기물(광미 등), 대기질 등의 시료를 조사대상 종류별로 구분하고 지번, 면적, 토지용도를 보고한다. D. 조사항목
3) 토양정밀조사결과	A. 조사지역 개황 B. 조사결과 분석 i. 시료채취 현황별 오염도 조사결과 ii. 토양, 광미 및 하천수 등 오염도조사결과 현황 iii. 오염토양 정화대상량 산정 제시(오염물질 종류별 대상량을 제시) iv. 조사결과 분석
4) 부지개념모델 작성 및 종합의견	i. 부지개념모델 작성 ii. 기존 부지개념모델 비교 iii. 데이터갭
5) 향후 대책계획	A. 오염토양 관리 및 정화를 위한 계획 및 대책 제시 i. 조사지역의 지형, 지질 등 입지상태와 오염물질의 종류 및 오염 범위, 오염도 등을 고려하여 기술적으로 적용가능한 오염토양 정화방법 및 대상지역의 토양오염 방지사업을 위한 사업 추진 필요성과 구체적인 방법 제시

5.4. 추가 보완 필요 사항

현재 오염 토양 조사 및 관리 방법을 기반으로 했을 때 어떠한 부분을 위해도 기반 오염부지 관리 체계에서 활용하는 부지개념모델 작성 방법에 대입하여 부지개념모델로 작성할 수 있는지 비교하고, 추후 부지개념모델에 해당하는 요소를 채우기 위해 조사 범위를 확장해야 할 필요가 있다. 특히 국내 토양오염 정밀조사의 경우, 수용체에 집중되어 조사된 것이 아닌 오염 매체인 토양 및 지하수 등에 초점이 맞추어 있다. 미국, 네덜란드, 캐나다 등 선진국에서는 1980년부터 토양만이 아닌 토양오염물질이 영향을 미칠 수 있는 오염부지 내 타 매체 또한 대상으로 하고, 오염물질의 총 농도가 아닌 오염물질이 인근 수용체에 미치는 위해성에 근거해 관리하고 있으며(장선우 외, 2020) 부지개념모델을 구성하는 데에 있어서도 수용체는 필수적으로 언급되고 있다. 따라서 이를 반영한 부지 단위의 오염 관리 체계에 적합한 방식으로 개선할 필요가 있을 것이다. 덧붙여, 부지개념모델을 국내 현행 오염관리제도에 도입하여 활용하기 위해서는 (1) 부지에 대한 법적 개념이 미비한 점과 (2) 수용체에 대한 조사결과가 제한적인 점을 문제점으로 꼽을 수 있다.

- 오염부지의 정의에는 수평적(범위) 수직적(심도) 경계와 이를 구성하는 매체가 명시되어야 한다. 예를 들면

“오염부지는 오염된 지하수와 지질매체(토양 및 암반)을 포함하는 지중환경으로서, 오염이 확인된 지점, 오염 누출 발생 시설, 오염원, 수용체(인체 및 생태)의 위치와 오염물질의 이동경로를 포함한다.”로 정의할 수 있다.

- 현행 오염부지를 대상으로 한 토양오염 정밀조사에서는 오염원 및 오염경로에 대한 조사는 명하고 있으나, 수용체 및 노출경로에 대한 조사는 위해성평가가 진행되는 일부 부지를 대상으로만 실시되기 때문에, 대다수의 오염부지 조사결과에서 국제적으로 통용되는 부지개념모델의 구성 요소를 충족하기는 어려운 상황이다.

6. 결 론

우리나라의 경우, 현행 제도상 CSM 작성을 부지 조사 기관에게 강요할 수는 없다. 그러나 지하수와 토양에 대한 통합오염관리와 위해성평가 확대 필요성에 대한 의견이 지속적으로 논의되고 있다. 지중환경 오염 관리제도의 개선 및 정착을 위해, 부지 단위의 오염 관리의 핵심 도구인 부지개념모델에 대한 선행적인 이해가 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 위해도기반의 부지 관리와 부지개념모델을 의사결정에 활용하고 있는 국가를 대상으로 국

제적으로 통용되고 있는 부지개념모델의 개념과 작성 및 개선 방법에 대해 조사하였다. 이 사례에서 지중환경 오염관련 의사결정과정에서의 부지개념모델의 유용성을 확인할 수 있었으며, 향후 부지개념모델 작성 제도의 국내 도입을 제안하였다. 이를 실행하기 위한 방안으로 현행 토양오염관리제도에서 운영 중인 토양오염 정밀조사 제도 내에 부지개념모델을 구축을 포함하는 방법을 제안하였다.

부지개념모델이 정밀조사 제도 내에 정착될 경우, 부지 관리 단계마다 부지의 특성화, 정화 기법 선정, 정화 최적화 및 검증 등을 위한 의사결정에 활용될 수 있을 것으로 기대되며, 부지에서 장기간 수행되는 지중환경 보호 관련 과업의 효율적이고 일관성 있는 판단을 지원하는 유용한 의사결정 도구로서 자리매김할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 지속적인 부지개념모델 개선과, 부지에 대해 부족한 정보를 지속적으로 구체화하고, 계획된 조사 및 정화 방법에 대한 정밀한 토의 및 검증이 수행되는 과정에서 각 단계에 맞는 의사 결정 기구, 데이터 요구 사항 및 인력을 갖출 수 있도록 해야 한다. 이는 향후 지중환경 보전 관련 전문인력 양성, 일자리 창출 및 산업의 발전으로 연결될 것으로 예상된다.

사 사

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

References

- Chang, S.W., Moon, H.S., Lee, E., Joo, J.C., and Nam, K., 2019, Numerical study of contaminant pathway for risk assessment in subsurface of contaminated sites, *J. Soil Groundwater Environ.*, **24**(3), 13-23.
- DTSC, 2008, PROVEN TECHNOLOGIES AND REMEDIES GUIDANCE - REMEDIATION OF METALS IN SOIL, 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, 2015, Integrated DNAPL Site Characterization and Tools Selection, https://projects.itrcweb.org/DNAPL-ISC_tools-selection/ (June 21st, 2022)
- 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)
- McLane Environmental LLC, 2018, A Quantitative Conceptual Site Model Approach for Environmental and Engineering Decision Making (https://www.flexaem.com/downloads/QCSM%20White%20Paper_2018.pdf)
- NAVFAC, 2017, Conceptual Site Model Development and Update Plan, Investigation and Remediation of Releases and Groundwater Protection and Evaluation, Red Hill Bulk Fuel Storage Facility, (https://www.epa.gov/sites/default/files/2017-09/documents/red_hill_conceptual_site_model_development_plan_2017-09-01.pdf)
- NJDEP, 2019, Technical Guidance for Preparation and Submission of a Conceptual Site Model, New Jersey Department of Environmental Protection (https://www.nj.gov/dep/srp/guidance/srra/csm_tech_guidance.pdf)
- 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, 1988, Guidance for Conducting Remedial Investigations and Feasibility Studies Under CERCLA, US Environmental Protection Agency, EPA 540-G-89-004, (<https://semspub.epa.gov/work/06/901141.pdf>)
- USEPA, 2006, Innovations in Site Characterization 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, US Environmental Protection Agency, EPA 542-R-06-007 (https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-08/documents/poudre_river_case_study.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>)
- Yang, K., Hwang, S.I., Park Y., and Jeong A., 2018, A study on the linked management of environmental media in contaminated sites, *Korea Environment Institute*, **2018**(0), 1-81.