

오염부지 최적 개념모델 수립을 위한 전략적 샘플링 기법 소개

박현지¹ · 김한석¹ · 윤성택¹ · 조호영¹ · 권만재^{1*}

¹고려대학교 지구환경과학과

Introduction to the Strategic Sampling Approaches to Construct Optimal Conceptual Model of a Contaminated Site

Hyun Ji Park¹ · Han-Suk Kim¹ · Seong-Taek Yun¹ · Ho Young Jo¹ · Man Jae Kwon^{1*}

¹Department of Earth and Environment Sciences, Korea University

ABSTRACT

Even though a systematic sampling approach is very crucial in both the general and detailed investigation phases to produce the best conceptual site model for contaminated sites, the concept is not yet established in South Korea. The U.S. Environmental Protection Agency (EPA) issued the ‘Strategic Sampling Approaches Technical guide’ in 2018 to help environmental professionals choose which sampling approaches may be needed and most effective for given site conditions. The EPA guide broadly defines strategic sampling as the application of focused data collection across targeted areas of the conceptual site model (CSM) to provide the appropriate amount and type of information needed for decision-making. These strategic sampling approaches can prevent the essential data from missing, minimize the uncertainty of projects and secure the data which are necessary for the important site-decisions. Furthermore, these provide collaborative data sets through the life cycle phases of projects, which can generate more positive proofs on the site-decisions. The strategic sampling approaches can be divided by site conditions. This technical guide categorized it into eight conditions; High-resolution site characterization in unconsolidated environments, High-resolution site characterization in fractured sedimentary rock environments, Incremental sampling, Contaminant source definition, Passive groundwater sampling, Passive sampling for surface water and sediment, Groundwater to surface water interaction, and Vapor intrusion. This commentary paper introduces specific sampling methods based on site conditions when the strategic sampling approaches are applied.

Key words : Strategic sampling approach, High-resolution site characterization, Conceptual site model, Contaminated site

1. 서 론

도시화 및 산업화에 따른 오염 증가로 인해 지중환경을 구성하는 토양·지하수와 같은 자연 자원의 효율적 관리와 국민건강 안전에 대한 중요성이 커지고 있다. 정화 및 복원을 포함한 효율적인 토양·지하수 관리를 위해서는 정확하고 체계적인 오염조사가 중요하며, 특히 오염지역을 대

표하는 토양·지하수 시료를 신뢰도가 높고 효율적으로 확보하기 위한 샘플링 전략이 필수적이다(Kwon et al., 2016; Kwon et al., 2018; US EPA, 2018).

오염지역 토양·지하수 샘플링을 위한 단계 중 하나는 샘플의 목적, 즉 ‘왜 이 시료를 채취해야 하는가?’에 대한 이유를 고려하는 것이다. 즉, 여러가지 목적에 따라 샘플링 프로그램의 방향이 달라지며, 목적에 따른 분류로는 표본추출을 위한 샘플링, 모니터링을 위한 샘플링, 그리고 오염존재 유무 확인을 위한 샘플링의 세가지 경우가 있다. 첫번째, 표본추출 샘플링은 오염물질로 인한 영향이 눈으로 확인되거나 예상되는 경우에 토양오염의 정성평가(qualitative assessment)에 사용된다. 표본추출 샘플링은 현장과 실험실에서 적절히 사용할 수 있고, 보다 상세한 샘플링 계획을 설계할 때 예비정보로 사용될 수 있다. 두

주저자: 박현지, 고려대학교 지구환경과학과, 학생
공저자: 김한석, 고려대학교 지구환경과학과, 연구교수
공저자: 윤성택, 고려대학교 지구환경과학과, 교수
공저자: 조호영, 고려대학교 지구환경과학과, 교수
*교신저자: 권만재, 고려대학교 지구환경과학과, 교수
E-mail: manjaekwon@korea.ac.kr

Received : 2020. 5. 19 Reviewed : 2020. 5. 26 Accepted : 2020. 6. 17
Discussion until : 2020. 9. 30

번째 모니터링 샘플링은 일정 기간 혹은 지리적으로 중요한 지역내에서 특정한 분석물질의 농도에 대한 정보를 제공한다. 모니터링 샘플링은 보통 표본추출에 의한 오염물질 농도 데이터나 현장의 오염물질 농도에 대한 과거 데이터를 확인한 후에 진행한다. 장기간에 걸친 모니터링 샘플링은 종종 규제 목적의 목적으로 필요하다. 세번째로, 오염 유무 샘플링은 오염물질의 존재 유무를 확인하기 위해 사용된다(IAEA, 2004; Swyngedouw, 2018).

오염물질의 특성과 범위의 결정, 환경적 영향 결정, 오염물질의 거동 모니터링, 오염물질의 정화, 정화의 효과에 대한 모니터링을 위해서는 오염부지 특성화(characterization)가 필요하며, 이러한 특성화를 통해 부지개념모델(conceptual site model, CSM)을 발전시키거나 완성할 수 있다. 한편, CSM은 어떠한 환경샘플이 필요한지에 대한 정보를 제공해주며, 오염물질의 종류와 범위 및 오염물질의 거동 예측과 함께 잠재 수용체를 확인시켜준다(Swyngedouw, 2018).

오염지역 토양·지하수 샘플링을 시작하기 전에, 샘플링 전략을 세우는 것이 필요하다. 이 때 샘플링 전략은 앞서 설명한 CSM에 기반을 두어야 하며, 어떻게 데이터가 사용될 것이고 평가될 것인지 사전에 고려해야 한다. 이 때 샘플링 종류는 다양한데, 기본 샘플링은 현장에서의 판단에 기반한 무작위 샘플링(random sampling), 무작위 구역별 샘플링(stratified sampling), 시스템 샘플링(systematic sampling)으로 나뉘어지며, 이 모두를 함께 사용할 수도 있다. 첫째, 무작위 샘플링은 오염물질의 분포에 대한 사전정보가 부족할 때 사용된다. 다른 샘플링 방법과 비교하여 상대적으로 많은 샘플수가 필요하고, 따라서 많은 비용이 소요된다. 둘째, 무작위 구역별 샘플링에서는 현장 전체를 조사 목적에 따라 여러 개의 구역으로 구분하고, 각 구역으로부터 무작위 샘플들을 채취한다. 각 층들은 표본추출, 현장조사, 그리고 지도(지형, 토양 종류, 토지사용 등)로부터 얻을 수 있는 정보에 따라 구분될 수 있다. 세 번째, 시스템 샘플링에서는 오염물질 분포에 대한 어떠한 가정을 두지 않고, 현장을 일정 면적 또는 간격의 격자(grid) 공간으로 구분한 후 샘플링을 실시한다. 시스템 샘플링은 오염물질이 특정 공간에 구역화 되어 분포하지 않고 상대적으로 균질하게 분포된 경우에 최적의 방법이다. 추가적으로 판단 샘플링(judgement sampling)은 오염물질의 거동과 함께 이동·분포에 대한 가정을 바탕으로 실시하는데 통계적인 측면에서 편향될 수 있다는 단점이 있지만, 현장에서 확보한 사전정보를 충분히 사용할 수 있으며, 사고처리 등 긴급 상황일 때 일반적으로 사용된다. 판

단 샘플링은 시스템 및 무작위 샘플링의 이점을 살리면서 함께 사용될 수 있다(Swyngedouw, 2018).

이러한 샘플링 기법은 주로 지표 근처 및 천부 오염토양 등 불포화대만을 대상으로 한 샘플링에 사용하는 기법이다. 심부 또는 포화대 오염의 경우에는 위에서 언급된 샘플링 방법 외에도 심도별 샘플링 방법에 대한 추가적인 고려가 필요하다. 아울러 포화대에서도 토양, 지하수, 암반 등 지질매체(오염매체)에 따라 그리고 각 매체의 지중환경 조건에 따라 차별화된 전략적 기법이 필요하다.

2018년 U.S. Environmental Protection Agency(EPA)에서는 슈퍼펀드(Superfund) 전담위원회 목표 달성에 도움이 되기 위해 세가지 기술 안내서를 발간하였다(<https://clu-in.org>). 특히 지난 50년간 다양한 오염환경을 대상으로 수집된 최적의 샘플링 전략에 대해 요약·정리하였다. EPA는 본 논문에서 소개하는 ‘전략적 샘플링 기법 기술 안내서(Strategic Sampling Approaches Technical Guide)’와 함께 2개의 추가적인 기술 안내서(Smart Scoping for Environmental Investigation(환경 조사를 위한 스마트 범위 관리)), Best Practices for Data Management(데이터 관리를 위한 최적방법론))를 함께 사용하기를 권장하고 있다(US EPA, 2018).

본 논문에서는 EPA ‘전략적 샘플링 기법 기술 안내서’를 소개하고, 그 내용을 바탕으로 국내 실정에 맞는 전략적 샘플링 적용 방안을 논의하고자 한다. 본 EPA 기술 안내서의 목적은 환경 전문가에게 프로젝트를 수행할 때나 현장에서 데이터를 수집할 때, 어떤 전략적 샘플링 기법이 필요한지와 어떤 샘플링 기법이 현장에서 효과적인지를 알려주는 것이다. 2장에서는 전략적 샘플링 기법의 개념에 대해서 정의하고, 전략적 샘플링 기법을 적용했을 때의 장점에 대해서 설명하며, 프로젝트 전주기(life cycle) 과정 중 다양한 상황을 고려하여 효율과 비용을 최적화할 수 있는 전략적 샘플링 기법에 대해 소개한다. 3장에서는 데이터 수집에 대한 효율성을 향상시키기 위해 사용할 수 있는 8가지의 전략적 샘플링 기법을 기술한다. 마지막으로 4장에서는 8가지 전략적 샘플링 기법과 관련한 국내 적용 현황 및 시사점에 대해 간략하게 토의하고자 한다.

2. 전략적 샘플링 기법의 정의 및 장점

2.1. 전략적 샘플링 기법이란 무엇인가?

프로젝트 전주기(life cycle) 과정 동안에 수집된 데이터를 종합하여 CSM을 개발하고 업데이트함으로써, 부지 특성화(site characterization)의 정밀도는 물론 정화 효율을

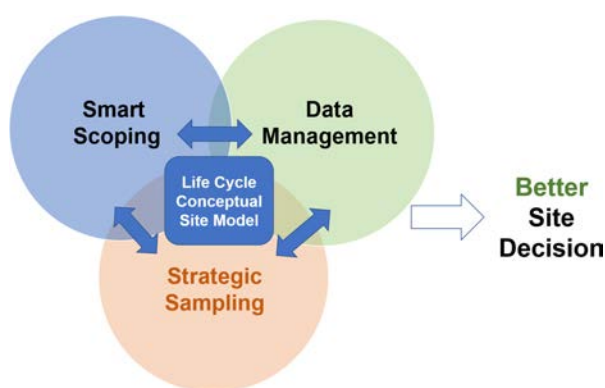


Fig. 1. Factors of Life Cycle CSM for improving site decisions [Figure redrawn from the original in US EPA (2018)].

향상시킬 수 있으며, 이는 궁극적으로 현장에서의 보다 확고한 결정 및 향상된 해결책 제시를 가능케 해준다. 특히, Smart scoping(스마트 범위관리), data management(데이터 관리), strategic sampling(전략적 샘플링)을 통한 CSM 업데이트를 통해 오염현장에 대한 이해도를 높여 오염부지의 최적 관리방안을 가능하게 한다(Fig. 1).

US EPA(2018)에서는 ‘전략적 샘플링’을 ‘의사결정(decision-making)을 위해 필요한 적절한 양과 종류의 정보를 제공할 목적으로 CSM 대상 지역에서 집중적인 데이터 수집을 하는 것’이라고 넓게 정의하고 있다. 전략적 샘플링 기법을 통하여 프로젝트 전주기 동안 오염복원 대안책의 평가는 물론이고 선정된 오염복원방법의 설계에 도움이 됨으로써 시행하는 복원사업을 향상시킨다. 또한, 자원을 보존하고 프로젝트 계획을 최적화하도록 도움을 준다. 아울러 전략적 샘플링 기법을 통해 오염원을 추적할 수 있게 되는데, 예를 들어 증기 침투경로(vapor intrusion pathway) 같이 특이한 오염물질의 이동경로를 확인할 수 있다. EPA는 데이터 수집을 효과적으로 계획하기 위해 스마트 범위관리(smart scoping)를 권장하고, 추가적인 기술 안내서인 “Smart Scoping for Environmental Investigation (환경조사를 위한 스마트 범위 관리)”에서 스마트 범위관리의 개념을 소개하고 있다.

2.2. 부지개념모델(CSM)의 역할

CSM은 이용가능한 데이터와 더불어 여러 가정에 기반한다는 것을 이해하는 것이 전략적 샘플링 기법을 계획하는데 있어 매우 중요하다. EPA에서는 ‘조사와 정화 전주기 단계에 걸쳐 Superfund 프로젝트팀, 유해 폐기물 부지정화 관리자, 의사결정권자를 도와주기 위해 프로젝트 전주기에서 CSM을 사용할 것’을 장려한다. 위에서 언급하

였듯이, CSM을 통해 어떠한 전략적 샘플링 기법이 적용되어야 할지를 판단할 수 있다. 반대로, 프로젝트 전주기를 통한 전략적 샘플링 결과물은 기존의 CSM을 업데이트하는데 도움을 준다.

2.3. 전략적 샘플링 기법의 장점

일반적으로, 오염복원 조사, 설계, 실시(action) 단계 또는 장기간의 오염복원 시행 단계에서 전략적 샘플링 기법의 장점은 다음과 같다. 1) 명시된 데이터 갭(gap)을 줄여 프로젝트의 불확실성을 줄인다, 2) 현장에서의 핵심적 의사결정에 필요한 데이터를 수집하고 배치 할 수 있게 한다, 3) 프로젝트 전주기 단계를 통해서 종합적인 데이터 세트를 생산할 수 있다, 4) 의사결정 시, 확실성을 담보할 수 있는 다양한 증거를 생산할 수 있다. 전략적 샘플링에서의 중요한 요소는 1) 핵심 결정사항, 의사결정권자, 현장에 대한 불확실성을 확인하기 위한 철저한 범위관리(scoping)와 계획(planning), 2) 배경치(baseline)와 최신의 CSM, 3) 최신 분석도구와 샘플링 기법 사용 극대화, 4) 잘 계획된 의사소통체계와 데이터 관리 및 시각화 작업이다.

2.3.1. 오염복원 조사 및 타당성 조사 중의 장점

전략적 샘플링 기법은 오염복원 조사(remedial investigation; RI) 및 타당성 조사(feasibility study; FS)의 업무 범위를 관리하는 동안에 다음과 같은 도움을 준다: 1) 오염의 정도 명시, 2) 위험성에 대한 평가, 3) 적용된 오염복원 기술에 대한 평가. 전략적 샘플링 기법은 첫째, 오염의 정도를 명시할 때 오염물질의 거동과 이동을 고려하여 더 높은 확실성을 제공하고, 오염원과 이동경로에 대해 보다 정확한 정보를 제공한다. 둘째, 전략적 샘플링 기법은 RI/FS의 한 부분으로서 수행되는 위해성 평가에 도움을 주는데, 위해성 평가를 위해서는 모든 잠재적인 이동경로, 노출경로, 수용체를 확인해야 하기 때문이다. 셋째, 전략적 샘플링 기법은 파일럿 연구를 포함하는 장기간에 걸친 기술 개발에 필요한 데이터 뿐만 아니라 잠재적인 위험을 감소시키기 위해 필요한 사전조치 정보를 제공한다.

2.3.2. 오염복원 설계와 복원 실행 중의 이점

오염복원 설계 단계 동안에 빈번한 데이터 수집이 필요한데, 이는 지중환경 특성화, 부지 특성화(예: 오염물질의 특성과 농도 또는 복원 설계에 도움을 주는 오염물질 분배(partitioning))와 관련된 불확실성을 해결하기 위함이다.

이러한 데이터 수집은 오염처리 물량의 증감, RI/FS에서 예상했던 것과 다른 오염의 확인, 오염처리 혹은 복원설계에 영향을 주는 새로운 복원과정 적용 등과 같은 현장 조건의 변화를 보다 잘 이해하기 위해 필요하다. 복원설계 전에 이러한 변화를 확인하고 해결하게 되면 복원설계는 의사결정기록(record of decision, ROD)에 있는 충족 조건을 제대로 만족시킬 수 있을 것이다.

오염복원을 위한 의사결정 시, 다양한 오염처리(예: 지하수처리) 기술을 선택할 수 있다. 기술을 선택할 때는 해당기술이 제대로 성능을 발휘하여 적용되고 있는지, 그리고 언제 다른 기술로 전환되어야 하는지 등의 의사결정 정보에 대한 고려가 필요하다. 이러한 성능목표에는 오염 물질 등의 다량 배출(mass discharge), 수확체감(한계생산 감소, diminishing returns)¹ 등이 포함된다. 미리 선택사항을 평가하고 목표를 결정함으로써, 오염복원 설계 중에 전략적 샘플링에 대한 의사결정이 수월하게 되고, 복원작업을 수행 동안 성능측정을 위해 필요한 데이터를 생산하는데 도움이 될 수 있다.

아울러, 전통적인 오염원 처리(예: 토양이나 퇴적물 굴착)에서는 오염복원작업이 완벽하게 고려되었는지를 판단하기 위해 확인용 시료채취(confirmation sampling)가 중요하다. 예를 들어, 전략적 샘플링 결정을 통해 정화과정 중 조사(즉, 과정 검증) 작업의 전략적 샘플링 방법 결정이 가능할 수 있으며, 또는 정화 완료 검증에 의한 종료 판정하기 위하여 필요한 샘플링의 수량을 줄일 수 있게 된다.

2.3.3. 장기간 오염복원 사업 중의 장점

장기간의 오염복원작업 동안 전략적 샘플링 기법을 사용함으로써, 복원작업이 부지별 완료 전략(site-specific completion strategy)에 얼마나 부합해가고 있는지를 평가할 수 있는 장점이 있다. Superfund 부지 정화에서는 부지별 완료 전략이 가능한 빨리 만들어지기를 권장한다. 부지별 전략은 유연하게 수립되어야 하고, 처음 수립될 시점에서의 정화 진행 단계를 고려하여 하나 이상의 문서로 기술될 수 있다. 부지별 완료 전략을 수립함으로써, 현장 구성원들로 하여금 가장 관련 있는 데이터와 더불어 부지 특이성을 고려한 과학적 의사결정을 위해 다양한 정보를 모으는데 있어 도움을 줄 수 있다. 특정 복원기술별 전략

(remedy-specific strategy)을 만들고 유지하기 위해 보통 수준의 노력이 필요한 반면, 정화에 대한 의사결정을 위한 데이터 수집은 시간과 비용이 많이 소요되므로 효율성이 향상될 수 있도록 보다 신중한 고려가 필요하다.

3. EPA 여덟 가지 전략적 샘플링 기법 소개

프로젝트 관리자와 현장 구성원들이 프로젝트의 전주기 동안 환경조사를 할 때, 전략적 샘플링 기법을 고려하게 된다. 이 장에서는 EPA가 제안한 8가지의 전략적 샘플링 기법에 대해 요약하여 기술한다. 8가지 전략적 샘플링 기법은 다음과 같이 분류되었다.

- 미고결층(unconsolidated) 부지환경에서의 고분해능 부지특성화(high-resolution site characterization, HRSC)
- 균열이 있는 퇴적암(fractured sedimentary rock) 부지 환경에서의 고분해능 부지특성화
- 증분샘플링(Incremental sampling; IS)
- 오염원 범위 산정(Contaminant source definition)
- 수동적 지하수 샘플링(Passive groundwater sampling)
- 지표수와 퇴적물에서의 수동적인 샘플링(Passive sampling for surface water and sediment)
- 지표수-지하수 상호작용(Groundwater to surface water interaction)
- 증기 침투(vapor intrusion)

이 장에서 기술된 전략적 샘플링 기법에서는 매체 및 오염물질 분포와 관련된 불균질성, 그리고 오염물질 양상과 매체 사이의 상호작용 등 현장에서 마주치게 되는 다양한 복잡성을 다룬다. 최근 일부 샘플링 기술이 주목받고 있는데, 예를 들면, 고분해능 부지특성화(HRSC)와 IS는 매체와 오염물질 분포의 불균질성을 다루는 반면, 수동적 샘플링은 지하수와 지표수의 상호작용에 대한 다양한 정보를 제공한다. Table 1과 2는 본 논문에 요약 기술된 내용에 대한 상세 설명과 부가정보, 그리고 교육정보를 얻을 수 있는 웹페이지 주소 목록이다.

3.1. 미고결층 부지환경 지하수의 고분해능 부지특성화

현장이 다음과 같은 특성을 갖고 있는 경우 이 전략을 고려해볼 수 있다.

- 미고결층(암반 제외 토양 심부) 환경에서 오염된 지하수인 경우
- 다양한 종류의 토양이 층상구조로 이루는 경우
- 비수용성 액체(Non-aqueous phase liquid; LNAPL (light)/DNAPL(dense))로 오염된 경우

¹ 일정 크기의 토지에 노동력을 추가로 투입할 때, 수확량의 증가가 노동력의 증가를 따라가지 못하는 현상을 일컫는 경제학 용어로서 복원을 위해 투입된 자원이 제대로 성능을 발휘하는지 여부에 대한 확인 필요

Table 1. Resources of “Strategic sampling approaches technical guide” issued by EPA

Web Resources and Description	Section
www.clu-in.org/characterization/technologies/hrsc/ EPA’s CLU-IN website contains a comprehensive set of HRSC resources in unconsolidated aquifers (EPA의 CLU-IN 웹사이트는 미고결 대수층 HRSC 관련 종합 정보를 포함하고 있음.)	· Section3-1 · Section3-2
www.triadcentral.org This website contains references, case studies, and other resources for an investigation using the Triad Approach. HRSC is best implemented using the Triad Approach (이 웹사이트는 참고문헌, 사례연구, Triad Approach를 사용한 조사에 대한 다른 resource를 포함하고 있음. HRSC는 Triad Approach를 사용함으로써 최상으로 수행될 수 있음.)	· Section3-1
https://www.serdp-estcp.org/ Strategic Environmental Research and Development Program (SERDP) and Environmental Security Technology Certification Program (ESTCP) are the Department of Defense’s (DoD) environmental research programs, harnessing the latest science and technology to improve DoD’s environmental performance, reduce costs, and enhance and sustain mission capabilities. (Strategic Environmental Research and Development Program (SERDP)와 Environmental Security Technology Certification Program (ESTCP)은 Department of Defense’s (DoD) 환경연구 프로그램이며, DoD’s environmental performance를 향상시키고 비용을 감소시키며, 임무 수행 능력을 증가시키기 위해 최신의 과학과 기술을 이용하고 있음.)	· Section3-1 · Section3-2 · Section3-4 · Section3-5 · Section3-6 · Section3-7 · Section3-8
www.clu-in.org/characterization/technologies/hrsc/ US EPA. Groundwater High-Resolution Site Characterization Course. CERCLA Education Center. 2016.	· Section3-1 (Highlight 1 / Figure 2 in this study) · Section3-2 (Highlight 2)
http://www.itrcweb.org/Team/Public?teamID=11 The Interstate Technology and Regulatory Council (ITRC) developed a technical and regulatory guidance document, Incremental Sampling Methodology (ISM-1). The document provides users with a practical working knowledge of the methodology’s concepts and principles, emphasizes the critical importance of clearly articulated sampling objectives, and provides a sound basis for adapting ISM to meet project goals and site-specific objectives. EPA and ITRC resources include additional references and case studies. (The Interstate Technology and Regulatory Council (ITRC)는 기술 및 규제 지침서, Incremental Sampling Methodology(ISM-1)를 발간하였음. 이 문서는 사용자에게 ISM 개념과 원리에 대한 실체적인 지식을 제공함. 또한 샘플링 목적의 중요성을 강조하고, 프로젝트 목표와 현장 조건에 따른 목적을 충족시키기 위해서 ISM을 채택해야만 하는 근거를 제공함. EPA와 ITRC resources는 추가적인 reference와 사례연구를 포함함.)	· Section3-3 (Highlight 3 / Figure 4 in this study)
https://clu.in.org/download/char/RolesofPMSandLabsinSubsampling.pdf EPA. 2013. The Roles of Project Managers and Laboratories in Maintaining the Representativeness of Incremental and Composite Soil Samples. OSWER Directive No. 9200.1-117FS. June(EPA/ 2013. 중분되고 composite 한 토양 샘플의 대표성을 유지하는 것에 대한 프로젝트 관리자와 실험실의 역할)	· Section3-3
EPA. Incremental Composite Soil Sampling course. CERCLA Education Center. June 2016.	· Section3-3 (Highlight 3 / Figure 4 in this study)
www.clu-in.org/hrsc EPA’s CLU-IN website contains a comprehensive set of resources for HRSC in unconsolidated aquifers. High-resolution site characterization techniques are recommended for characterizing NAPL sources in the subsurface(EPA CLU-IN 웹사이트는 미고결 대수층에서 HRSC에 대한 종합적인 정보를 포함하고 있음. 지중환경의 NAPL 오염원을 특정하고 설명하기 위해 High-resolution site characterization 기술이 사용되어야 함을 강조함.)	· Section3-4
http://www.itrcweb.org/DNAPL-ISC_tools-selection/Content/1%20Introduction.htm This ITRC document synthesizes the knowledge of DNAPL site characterization and remediation and provides guidance on characterization of contaminant distributions, hydrogeology, and attenuation processes (이 ITRC 문서는 DNAPL 부지 특성화와 복원작업에 대한 지식을 종합한 것으로 오염물질의 분포, 수리지질학, 그리고 감소 과정의 특성에 대한 지침서를 제공함.)	· Section3-4
https://cumulis.epa.gov/supercpad/cursites/csitinfo.cfm?id=0200781	· Section3-4 (Highlight 4 / Figure 5 in this study)

Table 1. continued

Web Resources and Description	Section
https://clu-in.org/characterization/ The Characterization and Monitoring section of EPA's CLU-IN website contains a discussion of the three generic forms of passive (no purge) samplers, and provides links to other references. The site also includes a table describing common analytes addressed by 15 different technologies (EPA's CLU-IN 웹사이트의 characterizing and monitoring 부분에서는 passive (no purge) samplers의 3가지의 일반적인 형태에 대한 토의를 포함하고 다른 참고자료로의 링크를 제공함. 또한 이 웹사이트는 15가지의 다른 수동적 샘플러 기술을 사용하여 조사할 수 있는 일반적인 오염물질을 정리한 표를 포함하고 있음.)	· Section3-5
https://www.itrcweb.org/GuidanceDocuments/DSP_4.pdf ITRC developed a Technology Overview of Passive Sampler Technologies, which includes a comprehensive table of advantages, limitations, availability and cost of 13 different passive sampler technologies (ITRC는 Technology Overview of Passive Sampler Technologies를 발간하였는데, 이 문서에는 13개의 서로 다른 passive sampler 기술의 이점, 한계, 이용가능성 그리고 비용에 대한 포괄적으로 설명하는 표가 포함되어 있음.)	· Section3-5 (Highlight 5 / Figure 8 in this study)
https://clu-in.org/download/contaminantfocus/sediments/Sediments-Passive-Sampler-SAMS_3.pdf EPA has developed a guideline for using passive samplers to monitor organic contaminants at Superfund sediment sites (EPA는 Superfund 퇴적물 오염현장에서 유기 오염물질을 모니터링하기 위해 필요한 수동적 샘플러 사용 지침서를 발간함)	· Section3-6
https://clu-in.org/download/contaminantfocus/sediments/Sediments-Passive-Sampler-SAMS_3.pdf	· Section3-6 (Highlight 6)
https://pubs.usgs.gov/tm/04d02/ EPA recommends the U.S. Geological Survey (USGS) document, Field techniques for estimating water fluxes between surface water and ground water as a practical compendium of methods for investigating the hydrologic characteristics of the groundwater/surface water zone(EPA는 지하수/지표수 zone의 수리학적 성격을 조사하는 방법에 대한 실용적인 제요 (compendium)로써 U.S. Geological Survey (USGS) 문서인 Field techniques for estimating water fluxes between surface water and ground water (지표수와 지하수 사이의 water flux 평가를 위한 현장기술)을 추천함)	
https://pubs.usgs.gov/wri/wri024186/pdf/wri024186.pdf joint publication EPA-USGS provides guidance on the application of passive samplers for delineating volatile organic compounds in groundwater discharge areas and nine case studies (EPA-USGS 공동출판물로 지하수 배출 지역에 존재하는 휘발성 유기 화합물 감지하기 위한 passive sampler의 사용지침과 연구사례를 제공함.)	· Section3-7
https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/gwsw_workshop.pdf The proceedings of EPA's Ground-Water/Surface-Water Interactions Workshop includes information on investigation methods and evaluation of the hydrological, chemical and ecological aspects of the zone (EPA의 Ground-Water/Surface-Water Interaction Workshop의 프로시딩 논문집으로 조사 방법에 대한 정보와 zone에 대한 수리학적, 화학적, 생태학적 평가를 포함함.)	
http://water.usgs.gov/ogw/bgas/thermal-cam/ (Forward looking infrared camera)	· Section3-7 (Forward looking infrared camera)
http://water.usgs.gov/ogw/bgas/fiber-optics/ (Distributed temperature sensor)	· Section3-7 (Distributed temperature sensor)
https://trainex.org/offeringslist.cfm?courseid=1515&all=yes EPA. Best Practices for Site Characterization Throughout the Remediation Process course. CERCLA Education Center. 2016(EPA. 오염복원 과정을 통한 부지 특성화의 모범 사례)	· Section3-7 (Highlight 7 / Figure 6 in this study)
https://clu-in.org/download/issues/vi/VI-Tech-Guide-2015.pdf In June 2015, EPA released a final vapor intrusion technical guide that describes a recommended framework for assessing vapor intrusion. This comprehensive guide provides EPA's current technical recommendations based on the most current understanding of vapor intrusion into indoor air from subsurface vapor sources (EPA는 증기침투 평가를 위해 필요한 framework을 설명하는 증기침투 최종지침서를 발간함 (2015년 6월). 이 종합지침서는 지하의 증기 근원 지로부터 실내 공기로의 증기침투에 대한 가장 최근의 이해를 기반으로 한 EPA의 현재 기술적인 권고를 제공함.)	· Section3-8

Table 1. continued

Web Resources and Description	Section
https://clu-in.org/download/contaminantfocus/vi/ITRC%20VI-1.pdf The ITRC Vapor Intrusion Pathway Guidance is a practical, easy-to-read, how-to guideline for assessing the vapor intrusion pathway and includes a companion guide that describes six different, yet common, hypothetical vapor intrusion scenarios and the investigation approaches that might be followed (ITRC Vapor Intrusion Pathway Guidance는 실용적이고 읽기 쉬우며 증기침투 이동경로를 평가하는 방법에 대한 지침서임. 또한 6가지의 다른, 그러나 일반적인 증기침투 시나리오와 이에 따른 조사 기법 지침서도 포함함.)	· Section3-8
https://clu-in.org/issues/default.focus/sec/Vapor_Intrusion/cat/Overview/ Additional resources may be found on the CLU-IN Issues: Vapor Intrusion (provides many links/guidance documents) (CLU-IN issues: Vapor intrusion (많은 링크 또는 지침서를 제공)에서 추가 resources를 확인할 수 있음.)	· Section3-3
http://www.itrcweb.org/ISM-1/8_5_1_2_Sampling_objectives_and_developing_the_decision_unit.html	(compositing and dilution 개념)

Table 2. Additional web link and description for training

https://trainex.org/offeringlist.cfm?courseid=1389 Groundwater High-Resolution Site Characterization (지하수관련 고분해능 부지특성화)	· Section3-1 · Section3-2 · Section3-4 · Section3-5
https://clu-in.org/conf/tio/bmp/ Best Management and Technical Practices for Site Assessment and Remediation, March 2015, CLU-IN Archived Webinar (현장 평가와 오염복원을 위한 최선의 관리와 기술적 방법론), March 2015, CLU-IN Archived Webinar	· Section3-1
https://clu-in.org/conf/tio/NARPM Presents18_050813/ (National Association of Remedial Project Managers Presents; Practical Applications and Methods of Optimization across the Superfund Pipeline, Parts 1 and 2, Spring 2013)	· Section3-1
https://clu-in.org/conf/tio/triad1_080409/ (Triad Month, Sessions 1 – 7, August 2009, CLU-IN Archived Webinar)	· Section3-1
https://clu-in.org/conf/itrc/ISM_020515/ Soil Sampling and Decision Making Using Incremental Sampling Methodology, Parts 1 and 2, February and March 2015, CLU-IN Archived Webinar (증분샘플링 방법을 사용한 토양 샘플링과 의사결정)	· Section3-2
https://clu-in.org/conf/tio/ISM1_021612/ Incremental Composite Sampling Designs for Surface Soil Analyses, Modules 1 – 4, CLU-IN Archived Webinar (지표 토양 분석을 위한 incremental composite sampling 설계, 모듈 1 – 4, CLU-IN Archived Webinar)	· Section3-2 · Section3-4
https://clu-in.org/conf/tio/xrf_080408/ (XRF Training, Sessions 1 – 8, August 2008, CLU-IN Archived Webinar)	· Section3-2
https://trainex.org/offeringlist.cfm?courseid=47 Remedial Design/Remedial Action Training(복원 설계 / 복원 작업 훈련)	· Section3-4
https://trainex.org/offeringlist.cfm?courseid=1515 Best Practices for Site Characterization Throughout the Remediation Process (복원 과정을 통해서 site characterization을 위한 모범 사례)	· Section3-4 · Section3-5
https://clu-in.org/conf/tio/passsamp_082613/ The Use of Passive Samplers to Monitor Organic Contaminants at Superfund Sediment Sites, August 2013, CLU-IN Archived Webinar (Superfund Sediment Site에서 유기 오염물질의 모니터링을 위한 수동적 샘플러의 사용)	· Section3-6
https://trainex.org/offeringlist.cfm?courseid=1374 (RPM 201, Sediment Module & Vapor Intrusion module)	· Section3-6 · Section3-8
https://trainex.org/offeringlist.cfm?courseid=1515&all=yes Best Practices for Site Characterization Throughout the Remediation Process (오염복원 과정을 통한 부지 특성화의 모범 사례)	· Section3-7
A Rapid Multi-Scale Approach for Characterizing Groundwater/Surface Water Interactions and Evaluating Impacts on Contaminated Groundwater Discharge, NARPM 2014. (지하수/지표수 상호작용에 대한 특성화와 오염된 지하수의 방출의 영향에 대한 평가를 위한 빠르고 다양한 스케일의 접근법)	· Section3-7
Vapor Intrusion 2014 Update, NARPM 2014 (증기침투)	· Section3-8

- CSM에서 오염물질의 저류와 이동에 대하여 불완전하거나 일반적인 이해만 있는 경우

미고결층 환경에서의 지하수는 자갈, 모래, 실트, 점토로 구성된 층상 분포나 이들 지층의 배열로 인해 발생하는 높은 불균질성 때문에 특성화하기 어렵다. 이러한 불균질성으로 인해 낮은 분해능의 조사기술을 이용하여 얻은 데이터와 그에 기반한 부지모델(CSM)에 불확실성이 야기될 뿐만 아니라, 오염물질의 분포와 이동에 있어서도 실제와 다른 결과를 보여주기도 한다. 이와 관련된 불균질성의 사례로는 높은 투수성을 갖는 모래와 자갈로 이루어진 얇은 층이나 낮은 수리전도도를 갖는 실트와 점토층 등에서 나타나며, 이러한 불균질성의 규모는 cm 내지 m 규모에 이를 수 있다. 또한, 이러한 불균질성의 규모는 관측공(monitored well), 양수시험(pump test), 순간충격시험(slug test) 등 전통적인 조사 전략을 적용하여 확인하기에는 너무 변화가 적어서 발견할 수 없다. 따라서 오염문제가 발생한 지중환경 공간 규모에 적합한 오염복원 기술을 선택하고 설계하기 위하여 정확한 CSM을 도출하기 위해서는 지질학적, 수리지질학적 상세 정보와 함께 오염물질에 대한 정보가 필요하다. 고분해능 부지특성화는 지하수 유동과 오염물질 농도를 상세하게 밝히는데 효과적인 기법을 제공한다.

목표로 하는 오염복원작업을 효과적으로 설계하고 수행하기 위해서는 더 높은 분해능으로 지중환경의 불균질성

을 이해하는 것이 필수적이다. 이러한 지중환경 특성화 작업을 통하여 (1) 조사 규모를 지중환경에서 예상되는 지질학적 불균질성의 규모와 일치시키는 것, (2) 지하수와 오염물질의 이동을 보여주는 3차원 구조를 정의하여 다양한 기술의 조합으로 구성된 오염복원 전략을 평가하고 설계하는데 필요한 데이터 제공이 가능하다. 충분한 고분해능 부지특성화를 통해 오염부지 현장을 오염원 처리(source treatment), 오염운 관리(plume management), 오염정화 준수 여부 모니터링(compliance monitoring) 영역으로 구분하여 오염복원작업을 효과적으로 적용하고 모니터링할 수 있다.

고분해능 부지특성화는 현장 관리자가 샘플 규모와 샘플링 간격을 3차원으로 결정할 수 있는 도구와 기법으로 이루어져 있다. Figure 2는 직관식(direct push) 시추기술을 사용하여 얻은 횡단면 기반의 다중심도 수직단면 예시이다. 횡단면(Transect)은 지하수 유동에 대해 수직방향이다. 심도별 오염물질농도 측정을 위한 샘플링에서는 샘플링 심도 간격을 최적화하기 위해 토양 종류와 수리전도도 정보가 필요하다. 이러한 종류의 데이터는 전통적인 시추기술, 직접적인 센싱기술, 직관식기술, 또는 이들이 혼합된 기술로 이루어진 특수장비를 활용하여 다중 심도에 걸쳐 수집된다. 심도별로 분리된 샘플에 존재하는 오염물질은 휴대용 모니터링 기기, 야외용 시험키트 또는 이동실험실(mobile lab.)을 이용하여 현장에서 실시간으로 분석

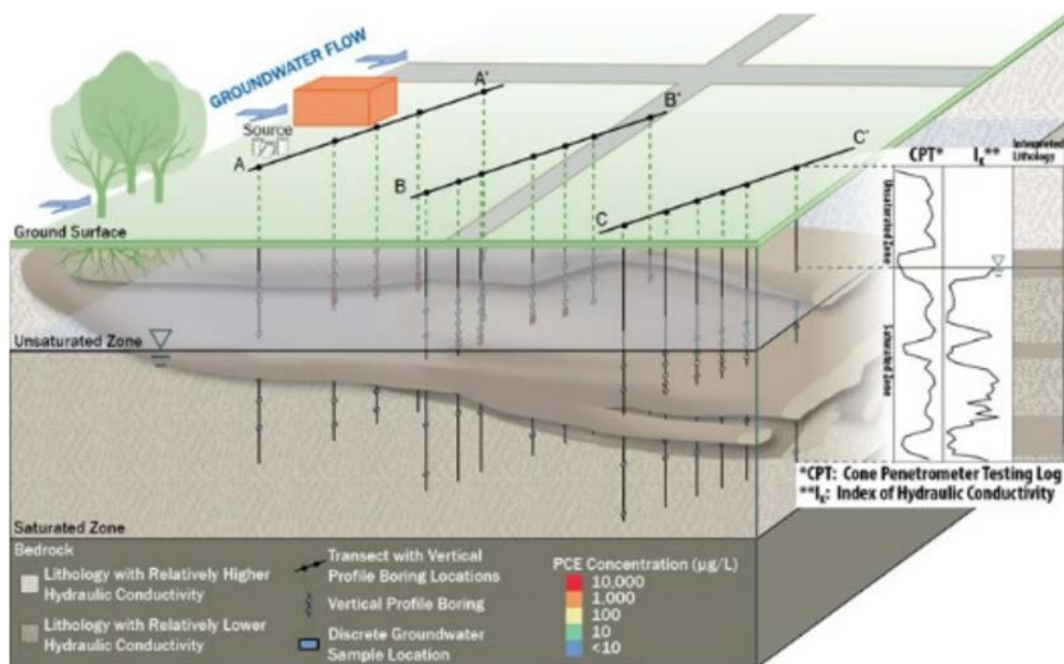


Fig. 2. Transect-based multi-level vertical profiling using direct push technology [US EPA (2018)].

할 수 있다. 오염물질의 연속적, 정량적 수직단면은 막 인터페이스 탐침(membrane interface probe; MIP) 또는 레이저 기반 형광분석(laser induced fluorescence; LIF)와 같은 직접감지장비 등을 사용해서 얻을 수 있다. HRSC 기법에서는 대수층 구성물질, 물리적/지화학적 성질, 오염물질 상과 농도에 대한 경향성을 확인하기 위한(예를 들어 저농도 오염원과 고농도 오염원 코어) 고밀도 데이터셋을 통합하고 시각화하는 것이 핵심요소이다. 수리경사 방향에 수직 방향으로 획득한 지중환경의 지질학적, 수리학적, 오염물질 분포 단면을 통하여 2차원 단면 또는 더 나아가 3차원 시각화가 제공된다. 아울러 지구통계학적 데이터 내삽법(interpolation)을 이용함으로써 데이터 지점 사이의 분석되지 않은 공간에 대한 수리전도도와 오염물질 분포 등의 대수층 물질 특성을 3차원적으로 추정할 수 있다.

HRSC 장비를 이용하여 보다 정확한 CSM 도출을 위한 중요 데이터를 획득할 수 있지만, 개별 장비를 이용하여 생산할 수 있는 데이터의 형태나 적용 장소 등은 지중환경의 특성에 따라 한계를 가지고 있다. 예를 들어 MIP의 센서는 재질이 민감하고 섬세하여 암석이 많고(rocky)이 많고 밀도가 높은 토양에 사용될 경우 손상될 수 있다. 한편, 무거운 중량의 관입시험(cone penetrometer testing; CPT) 트럭은 지반시설에 손상을 입힐 수 있다. 지중환경센서는 분석 감지한계(detection limit)로 말미암아 상대 농도나 투수율 등에 대해 불확실한 데이터를 제공할 수도 있다. 따라서 종합적인 데이터(collaborative data)와 기타 여러 증거를 통해 추가적으로 검증할 필요성이 있다. 또한, CSM에 필요한 데이터 확보를 위해서는 적절한 데이터 수집 장비를 이용하여 누락된 데이터를 충분히 보완해야 한다.

HRSC를 수행할 때, 프로젝트 구성원들은 각 부지특성화 장비를 적용할 수 있는 현장조건과 실제적용 한계를 인지하고 사전에 적용성을 고려할 필요가 있다. 오염현장에서의 계획과 범위관리 작업에는 CSM을 업데이트하기 위한 기술 데이터 뿐만 아니라, 현장 접근성, 지반구조, 토양의 종류, 깊이, 그리고 시추플랫폼/우발적사고 등의 평가도 포함된다.

마지막으로 특히 미고결층 환경에 중요한 개념인 역확산(Back diffusion)에 대해 간략히 설명하고자 한다. 역확산은 오염물질이 투수율이 낮은 곳에서 높은 곳으로 확산에 의해 이동하는 것이다. 서로 다른 공극률(porosity)의 저투수율 매질과 고투수율 매질이 접촉하고 있는 조건에서, 오염원(pollutant plume)이 초기에 저투수율 매질로 스며들거나 갇힐 수 있다. 특히, 오염물질의 농도가 고투

수율 매질에서 높을 때, 많은 양의 오염물질이 저투수율을 가진 매질로 확산된다. 이와 같이, 저투수율 매질에 있던 오염물질이 다시 고투수율 매질로 이동하는 것을 역확산이라고 한다. 이러한 현상은 장기간의 2차 오염원으로 작용할 수 있고, 이로 인해 오염물질은 원래의 오염원에 국한되지 않고 오염원 전체에 걸쳐 광범위하게 발견될 수 있다. HRSC를 통해 오염물질이 농집되어 있거나 역확산이 발생하는 곳을 확인할 수 있다(US EPA, 2016).

3.2. 단일 퇴적암 부지환경에서의 고분해능 부지특성화

다음과 같은 특성을 갖고 있는 현장에 대하여 이 전략을 고려해볼 수 있다.

- 단열이 있는 퇴적암이 기반을 이루는 경우
- 단열을 통한 흐름이 지배적일 경우
- LNAPL/DNAPL로 오염된 경우
- 오염원의 안정성에 대한 우려가 있을 경우
- 단열과 매질의 상호작용이 수반되는 유동에 의해 CSM이 불완전한 경우

사암과 석회암 등 단열이 있는 퇴적암은 입자사이 공극에 의한 1차공극률과 함께 균열로 인해 생긴 2차공극률을 가지고 있다. 셰일과 실트암은 중간 정도의 불투수성을 가지고 있지만, 수평 층리면과 단열을 따라 물이 이동할 수 있다. 셰일과 실트암 등 미세입자로 이루어진 퇴적암도 구성매질을 통해 오염물질 확산이 가능할 만큼의 충분한 공극률을 가지고 있다. 불균질한 미고결층 매체에서 살펴본 역확산에서와 같이, 공극을 통해 확산한 용존 오염물질이 단열 구간으로 이동 침투하게 될 경우 오염원이 될 수 있다.

단열 퇴적암 지역을 조사할 때는 CSM 작성시 매질과 단열 사이의 상호관계를 고려해야 한다. 이를 위해서는 매질과 단열을 특성화하기 위한 종합적인 기법이 요구된다. 암석-코어 물질의 화학적, 광물학적, 생물학적 특성에 관한 실험실 측정과 함께, 다양한 시각적 검증과 현장조사 기술을 사용하여 조사할 수 있다. 시추과정 중 시추공 자체에 대한 측정이 이루어질 수 있으며, 시추가 완료된 후에도 라이닝을 하지 않은 시추공 또는 라이닝한² 시추공을 통하여 장·단기 기간에 걸친 측정이 가능하다.

단열 퇴적암에 대한 고분해능 부지특성화(HRSC) 전략을 통하여 투수성 단열과 그에 관련된 유동 특성을 확인하고, 암석 매질에 흡수된(장기적인 오염원으로 작용할 수 있는) 오염물질 양 뿐만 아니라 단열대 유체흐름에서의

2 예: Impermeable FLUTe™ Liner

오염물질의 양상과 농도를 밝히는 것이 중요하다. 팩커시험(Packer testing), 지하수 샘플링, 물리탐사, 음파 또는 텔레뷰어와 공경 검층(caliper logs), 시추공 유량계, 온도 검층 등이 단열 매체의 특성화를 위해 사용되는 장비/장치이다(Table 3). 그러나 잠재적인 교차오염이 문제가 될 수 있는데 이를 방지하는 전략으로 시추공을 라이닝(lining)하고 시추공 개방 시간을 조절할 수 있다. 시추공 라이너 설치를 통하여 연결성이 없다고 판단되던 단열이

실제 수리적 연결성을 갖는지를 확인하는데 도움을 줄 수 있고, 설치 중 또는 후에는 중요한 단열대 흐름과 오염물질 분포에 대한 정보를 얻을 수 있다(Fig. 3). 아울러 설치 후에는 시추공 내에서의 물리검층, 온도검층 및 수직적 프로파일링 기술을 추가 적용할 수 있다.

균열 암반 내 오염물질 분포를 확인하고, 균열망이나 균열 사이의 암반 기질 블록에서의 오염물질의 거동을 이해하는데 사용될 수 있는 종합적 조사기법 세트가 개발되어

Table 3. Strategic sampling approaches for each condition of sites [US EPA (2018)]

Site conditions	Strategic sampling approaches
1. High-Resolution Site Characterization for Groundwater in Unconsolidated Environments (미고결 환경에서의 고분해능 부지특성화)	Geology and Hydrogeology Data (지질학, 수리지질학 데이터) - Soil coring - Cone penetrometer testing - Electrical conductivity meter - Hydraulic profiling tool - Borehole flow meters - Flow velocity sensor - Point velocity probes - Mini-piezometers - Thermal imaging with FLIR and DST Qualitative Contaminant Data (정성적인 오염물질 데이터) - Membrane interface probe - Laser induced fluorescence Quantitative Contaminant Data (정량적인 오염물질 데이터) - Passive flux meters - Polyethylene diffusion bags - Mobile laboratory - Fixed-based laboratory
2. High-Resolution Site Characterization for Fractured Sedimentary Rock Environments (균열이 있는 퇴적암 환경에서의 고분해능 부지특성화)	- Packer testing - Borehole liners - Groundwater sampling - Multi-level groundwater sampling - Geophysics - Acoustic and optical viewer - Caliper logs - Borehole flowmeters - Temperature logs - Rock core sampling using microwave assisted extraction
3. Incremental sampling (증분샘플링)	- Decision unit selection: knowledge of site conditions, data quality objectives, statistical assistance(현장 조건에 대한 지식, 데이터 질의 목적, 통계적인 도움) - Sample support: shape, orientation, and size (모양, 방향, 크기) - Sampling processing (샘플링 과정): grinding (갈기), drying (건조), sub-sampling (부표본) - Mobile laboratory or fixed-based laboratory (모바일 랩 혹은 고정된 실험실) - XRF instrument for specific contaminants (특정 오염물질에 대한 XRF 기기)
4. Contaminant Source Definition (오염원 범위 산정)	- Direct push technologies (직접적인 push 기술) - Geophysics (지구물리학) - XRF - Membrane interface probe (MIP) - Laser induced fluorescence (LIF) - Mobile laboratory or fixed-based laboratory (모바일 랩 혹은 고정된 실험실) - High-resolution sampling strategy (High-resolution sampling 전략) - IS - 3DVA

Table 3. continued

Site conditions	Strategic sampling approaches	
5. Passive Groundwater Sampling (수동적 지하수 샘플링)	<p>Devices that recover a grab sample (Grab sample을 수거하는 장비)</p> <p>Devices that rely on diffusion of the analytes to reach equilibrium between sampler and well water (Sampler와 well water 사이에 평형을 도달하기 위한 분석물질의 확산에 의존하는 장비)</p> <p>Devices that rely on diffusion and sorption to accumulate analytes in the sampler (Sampler에 분석물질을 축적하기 위한 diffusion (확산)과 sorption(흡수)에 의존하는 장비)</p>	<p>Two proprietary options are discussed</p> <ul style="list-style-type: none"> - Regenerated-Cellulose Dialysis Membrane Sampler - Nylon-Screen Passive Diffusion Samplers (NPSPDS) - Passive Vapor Diffusion Samplers (PVDs) - Peeper Samplers - Polyethylene Diffusion Bag Samplers (PDBs) - Rigid Porous Polyethylene Samplers (RPPS) - Semi-Permeable Membrane Devices (SPMDs) - Polar Organic Chemical Integrative Sampler (POCIS) - Passive In Situ Concentration Extraction Sampler (PISCES)
6. Passive Sampling for Surface Water and Sediment (지표수와 퇴적물의 수동적 샘플링)	<ul style="list-style-type: none"> - Polyethylene samplers - Polyoxymethylene samplers - Solid phase micro-extraction samplers - Methodology for translating measured concentrations in the passive sampler into dissolved concentrations around the passive sampler (passive sampler에서 측정된 농도를 passive sampler 근처에서의 용해된 농도로 변환하는 방법) 	
7. Groundwater to Surface Water Interactions (지하수와 지표수의 상호작용)	<ul style="list-style-type: none"> - HRSC techniques for groundwater component - Passive flux meter - Passive samplers - Mini-piezometers - Push point sampler - Forward looking infrared camera - Distributed temperature sensor - Multi-level bundle piezometers - Ground penetrating radar 	
8. Vapor Intrusion (증기침투)	<p>Building assessment (건물평가)</p> <p>Vapor source assessment (증기 근원지 평가)</p> <p>Indoor air sampling (실내 공기 샘플링)</p> <p>Outdoor air sampling (실외 공기 샘플링)</p> <p>Sub-slab soil gas sampling (Sub-slab 토양 가스 샘플링)</p> <p>Groundwater characterization and monitoring (지하수 characterization과 monitoring)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Evacuated canisters (진공처리한 canisters) - sorbent samplers (active and passive) - Use methods akin to indoor air sampling (실내 공기 샘플링과 유사한 방법 사용) - sampling probe (s) - Evacuated canisters (진공처리한 canisters) - HRSC - Monitoring well network

있으며, 캐나다 Guelph 대학에서 제시한 불연속 균열망 (discrete fracture network, DFN)은 그 중 하나이다 (Parker et al., 2012). 전략적 위치에 선정된 시추공에서 연속 암석 코어 샘플링을 하면서 단열대 흐름을 특성화하

기 위한 유연 라이너 수리전도도 프로파일링(flexible liner hydraulic conductivity profiling) 및 물리검층, 수리시험, 다중심도 모니터링 시스템 등을 활용하여 중요한 데이터를 수집하게 된다. 이러한 데이터는 오염원과 오염원의 특

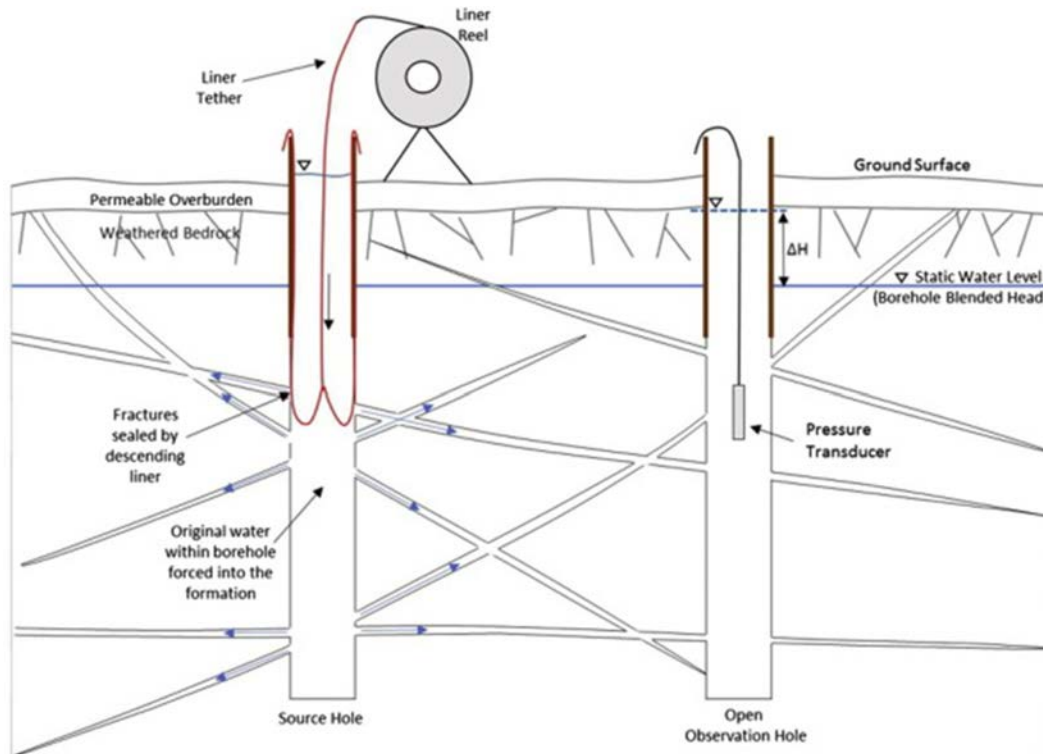


Fig. 3. Borehole liner installations used as an innovative cross-hole testing method (Persaud et al., 2018).

정이 제대로 반영된 부지모델(CSM)을 도출하는데 사용되며, 이렇게 업데이트된 CSM은 오염물질의 거동을 예측하기 위한 지하수 유동 수치모델의 입력 인자로 사용된다. 최종적으로 오염복원 설계는 장·단기 동안 예상되는 오염물질의 거동을 바탕으로 실시하게 된다.

이러한 종류의 샘플링 기법은 오염물질이 균열을 통해 이동하고 암석 기질 내로 확산할 수 있는 현장에서 적용 가능하다. 일반적으로, 이러한 환경은 화성암이나 변성암 등 결정질 암석이 아닌, 일반적으로 5~20% 범위의 암석 기질 공극률을 가진 퇴적암(사암, 석회암, 백운암)이 나타나는 현장이다. 유기 오염물질이 DFN 적용에서 가장 흔히 연구된 오염물질이지만, 공극에서 확산하고 갇힐 수 있는 가능성이 있는 다른 종류의 오염물질도 고려되어야 한다. 특히, LNAPL과 DNAPL의 유출이 있었던 오염현장에서는 종합적인 데이터와 다양한 증거를 제공할 수 있는 샘플링 전략이 적합한데, 이는 NAPL의 운명과 이동 양상이 매우 복잡하여 단 하나의 증거나 정보로는 해결할 수 없기 때문이다.

단열 퇴적암 조사를 위한 전략적 샘플링 기법의 단점은 위에서 설명한 오염현장 조건 뿐 아니라, 현장 조사에 요구되는 높은 수준의 특화된 서비스를 제공하는 프로젝트

팀의 존재, 납품회사의 이용가능성과 관련되어 있다. 전체적인 팀을 구성하고 이용하는 것은 EPA의 추가적인 기술적 안내서인 “환경 조사를 위한 스마트한 범위관리(Smart Scoping for Environmental Investigations)”에 최적방법론 중의 하나로 기술되어 있다. 또한 오염복원 계획을 도출하고 실행하는데 있어 지질학자, 지구물리학자, 수리지질학자, 공학자 그리고 많은 모델러로 구성된 다학제적 팀의 구성이 요구된다. 시추기, 암석 시편/코어 분석이 가능한 실험실, 시추 물리학적 서비스와 시추공 내 유연 라이너(flexible borehole liner) 공급을 포함한 전문적인 납품회사 등이 복잡한 샘플링 전략을 실행하는데 필요하다.

단열 암석 조사방법에서 전략적 샘플링 기법의 이점은, 암반 균열과 기질 사이의 상호작용에 대한 상세한 정보를 통해 오염복원 설계에 필요한 지하수 유동과 이동 예측을 보다 정확하게 할 수 있다는 점이다. 이 기법에서는 기질 확산의 가능성이 있는 암석 기질 근처 및 오염물질의 상이나 플럭스 인접부에서 오염물질을 저장하고 이동시킬 가능성이 있는 단열을 명시하고 도면화(mapping)하는데 초점을 둔다. 예를 들어 오염복원 설계 중인 부지의 경우, 이러한 방식으로 수행된 CSM에서는 오염물질을 이동시켜 현장을 위험하게 만들 수 있는 단열에 초점을 둘 수

있다. 혹은 오염원이 정지상인지, 그리고 제한적이고 목표 지향적인 적극적 오염복원기술과 더불어 수동적 복원기술을 조합하여 사용함이 적절한지에 대한 판단 근거를 제시할 수 있다.

단열 퇴적암에서의 오염물질 유동은 복잡할 수 있으며, 따라서 HRSC을 위해 다양한 장비/장치, 전략, 그리고 시각화와 모델링 기술이 사용된다. 오염복원 작업을 계획하고 범위관리를 할 때, 프로젝트 관리자는 확대된 프로젝트팀 및 이해관계자와 함께 종합적인 데이터 세트를 통합하는데 많은 시간을 할애하게 된다.

3.3. 증분 샘플링(Incremental sampling)³

다음과 같은 특성을 갖고 있는 현장에 대하여 이 전략을 고려해볼 수 있다.

- 넓은 지역에 걸쳐 오염된 천부 토양의 경우
- 토양 오염물질 농도가 불균질한 경우
- 공간적 상관관계가 낮은 다중 유출 기작을 보이는 경우(대기로부터의 침적 vs 기타 유출)
- 안정하고 비휘발성인 오염물질로 오염된 경우(중금속류, 화약류, PAHs 등의 물질)
- 오염물질 분석 비용이 높을 경우

전통적인 토양 샘플링 방법에서는 정화의 규모를 결정하는데 필요한 정확하고 일관성 있는 데이터를 제공하지 못하는 경우가 많은데, 그 이유는 전통적 방법은 토양에 있는 오염물질의 불균질성을 고려하지 않기 때문이다. Incremental sampling(IS) 기술은 샘플링으로 인한 변화성을 줄일 수 있는 프로토콜을 제시하고, 보다 대표적인 노출 시나리오에 대한 샘플링 결과를 제공하며, 한정된 토양의 면적이나 부피 내에 있는 오염물질의 대표성을 함의적으로 확인하도록 고밀도의 공간적 범위를 다룬다. 매질의 불균질성으로 인한 고유의 변화성을 해결하기 위해, IS는 한정된 토양 샘플링 면적과 깊이 간격을 갖는 단위(a decision unit, DU로 알려짐)로부터 규칙적으로 같은 질량을 갖는 소량의 여러 토양 증가분(increments)을 샘플 수집하는 것과 그 증가분 샘플들을 하나의 샘플로 간주하여 혼합하는 것을 포함한다. 이러한 과정을 거친 현장 샘플은 균질화와 추가적인 절차를 거쳐 확정된 DU와 오염물질의 노출 기작 혹은 가능성을 판단하는 근거로 사용될 수 있다. IS 전략은 샘플의 다양성과 토양의 불균질성으

로부터 오는 데이터의 불확정성을 줄여서, 오염된 토양의 DU 부피를 더 정확하게 기술할 수 있다.

IS 과정에서 혼합(Compositing)과 희석(Dilution) 개념에 대한 이해와 고려가 필요하다. DU내에 고농도로 오염된 주의지점(hot spots)이 IS 방법을 통해 DU내 저농도로 오염된 증분들과 섞여서 희석되는 것이 문제가 될 수 있으며 이 때 주의지점에 대한 다음의 2가지 우려가 있다: 1) 샘플링 밀도, 2) DU에 대한 정의. IS 방법은 오염정화 조치 수준(action level)이 DU내의 오염물질 평균 농도에 기반을 둘 때, 법적인 이행문제를 효과적으로 해결할 수 있다. 공간 분해능과 관련된 우려는 DU의 규모를 바꿔서 주의지점의 크기와 같게 만들어서 해결할 수도 있다. 단일 샘플링 이벤트에서 적절한 수준의 고농도와 저농도 오염물질을 가진 하위지역을 포함할 확률은 DU내에서 수집된 샘플의 수와 직접 관련되어 있다. 다른 샘플링 설계방법과 비교하여 IS 방법의 이점은 큰 규모의 샘플들을 수용할 수 있다는 것이다. 이러한 이유로 주의지점에서 수집된 어떠한 개별적인 샘플이라도 큰 집단의 샘플 내에서 희석되는 반면에, DU내에서 실제적인 평균을 측정할 수 있다. 이러한 IS 방법의 이점을 바탕으로 정화 조치 수준과 함께 법적 이행에 대한 우려를 해결할 수 있지만, 공간적인 분해능에 대한 우려는 다루지 않고 있다. 만약 데이터 질에 대한 목적이 고농도로 오염된 소규모 지역을 찾아내고 그 범위를 결정하는 것이라면, IS방법을 이용한 샘플링은 DU 규모를 우려대상 주의지점의 규모와 같게 축소함으로써 처리할 수 있다.

IS 수행을 위한 부지 조건에 따른 샘플링 전략을 발전시키기 위해 스마트 범위관리(smart scoping)가 필요하다. Data user(위해성 평가자와 설계 공학자), data quality manager(데이터 질 관리자)와 샘플링 구성원을 포함한 프로젝트 구성원은 DU에 대한 선택 이유, increment 부피, 그리고 수집한 횟수를 명시한다. DU 크기와 부피는 일반적으로 정화기준의 농도보다 높은 오염물질이 있는 오염원(더 작은 DUs)에서의 적용가능한 오염복원 전략과, 초과되지 않았지만 잠재적인 노출을 평가하기 위해 샘플링이 필요한 지역(더 큰 DUs)의 노출 시나리오에 의해 결정될 수 있다. DU에서 요구되는 크기와 부피는 없지만, DU는 일정한 용지(residential settings)를 위해서 작게는 몇 인치의 깊이와 10'×10' grid에서부터 크게는 6인치의 깊이와 1/4-1-acre 규모까지의 범위를 갖는다. DU는 직사각형이나 정사각형과 같은 규칙적인 모양일 수도 있고 불규칙한 모양으로 조절될 수 있으며, 1 acre 보다 큰 규모의 DU는 일반적으로 농업, 레크리에이션, 산업 노출 시

³ EPA에서는 Incremental sampling에 일부 부적절하거나 일괄적이지 않은 정보(예: sampling unit vs decision unit)가 있다고 판단하여 이를 수정한 새로운 버전의 incremental sampling 가이드라인을 2020년 가을에 공개할 예정이다.

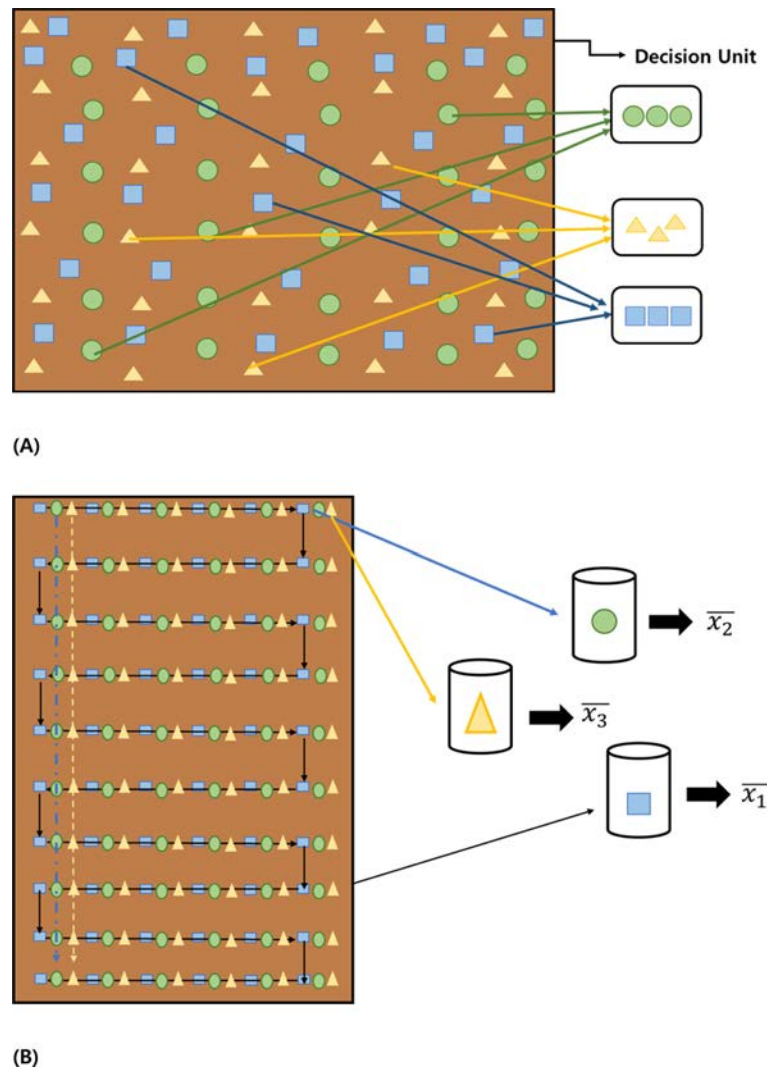


Fig. 4. Incremental Sampling (IS) Replicate Samples in a Decision Unit. (A). Incremental Sampling Methodology by ITRC (B) [Figure redrawn from the original in US EPA (2018)]

나리오를 위해서 사용된다.

Figure 4A는 어떻게 DU가 IS 전략을 통해 어떻게 3중복으로 샘플링 되는지 보여주며 Figure 4B는 최근에 ITRC에서 업데이트한 IS 전략을 보여주는 모식도이다. DU내에서 샘플링 간격을 일정하게 정하고 3중복으로 샘플링하는 모습을 볼 수 있다. 각각의 IS 샘플은 30개의 증가분(increments)으로 만들어진다. 삼각형 지점은 첫번째 IS 샘플을 위해 모아진 것을 보여주고, 정사각형 지점은 두번째 IS 샘플을 위한 것을 나타내며, 동그라미 지점은 세번째 IS 샘플을 나타낸다. 이러한 세개의 IS 샘플들은 각각 다른 오염정도를 나타낼 것이다. 3중복 값이나 그 이상의 중복 값을 통해 오염농도에 대한 신뢰도를 계산할 수 있다. 한편, EPA는 토양 중금속 시료를 채취하

기 위해 휴대형 x선 형광분석(XRF)와 IS 기법을 함께 적용하는 시도를 해왔으며, 최근 국내에서도 ICP 자료를 주데이터로, 그리고 저비용의 휴대형 XRF를 자료를 부자료로 활용하여 오염도 평가의 신뢰도를 높이는 방향을 연구한 바 있다(Kim et al., 2019). EPA는 의사결정 시 필요한 양질의 데이터 확보를 위해 샘플 준비와 XRF 분석 과정 동안 높은 질의 품질보증/관리(QA/QC) 절차를 따른다. IS 프로그램을 위해 개발된 ‘샘플링 계획과 품질보증 프로젝트 계획(sampling plans and quality assurance project plans - QAPP)’은 현장 샘플 수집 과정에 대한 상세한 과정과 설명을 포함하고 있다. 샘플 채취 시에서 부표본(sub samples)을 수집하기 위한 과정뿐만 아니라, 토양 샘플 수집에 사용되는 도구의 종류 역시 고려해야한

다. 샘플링 과정은 샘플링 설계에 있어서 중요한 부분이며 데이터에 중요한 영향을 미칠 수 있다. 예를 들어 작은 토양 입자는 큰 입자보다 더 높은 오염물질 농도를 가지는 경향이 있으므로 토양 체거름(soil sieving), 파쇄(grinding), 분쇄(disaggregation) 등의 샘플 전처리 과정이 토양의 물성에 미치는 영향에 대하여 사전에 고려해야 한다. 샘플 전처리 과정은 현장에서 마무리되거나, 현장에서 시작해서 실험실에서 완료되거나 혹은 모든 과정이 실험실에서 마무리될 수 있다. 이러한 모든 고려사항은 체계적인 계획하에서 다루어져야 하고 QAPP에 기록해야 한다.

3.4. 오염원 산정(Contaminant source definition)

다음과 같은 특성을 갖고 있는 현장의 경우 이 전략을 고려해볼 수 있다.

- 복잡한 오염원으로 이루어진 경우(LNAPL/DNAPL로 오염된 경우, 오염원이나 폐기물이 분산되어 있는 경우, 불포화대가 있는 경우)
- 오염원 처리나 제어를 위한 설계가 필요한 경우
- 오염역사가 불확실하고 불균질성/이방성의 대수층을 갖고 있는 경우
- 오염원 이동 간 상관성에 대하여 불완전한 CSM을 가진 경우

오염원 산정을 위한 전략적 샘플링 설계를 통해 3D 오염원 부피와 위치를 정확하게 측정하여 원위치 또는 비원위치 기술 적용에 활용할 수 있다. 오염현장에서의 많은 비용과 계획에 대한 문제를 일으키는 2가지 일반적인 이유는 오염복원 과정의 비용과 관련되는 오염 부피를 과소 측정하거나, 원위치 기술의 적용을 위한 핵심단서(footprint)를 과대 혹은 과소 평가하기 때문이다. 따라서 비용과 시간적인 측면에서 가장 효과적인 오염 복원 설계가 적절한 규모로 되었는지 확인하기 위해서는 향상된 CSM이 반드시 필요하다. 고밀도 데이터는 정화처리 요소에 초점을 맞출 수 있도록 도와준다.

비용 효율이 높은 설계 대안을 설명하고 복원 설계를 최적화하기 위해서는 CSM의 화학적 수리지질학적 특성에 대한 정확한 이해가 필요하다. 현장 관리자는 많은 양의 실시간 데이터와 함께 오염정도를 측정하기 위한 DU 개선을 통해 CSM을 향상 및 확장시킬 수 있다. 고분해능 부지특성화 기술은 비록 초기에 상대적으로 고비용이 들지만 보다 정확한 오염원 범위 산정에 있어 유리할 수 있다. 고분해능 기술적용을 통해 원위치 오염복원작업을 최적화하거나 처리할 오염물질을 더 잘 구분하기 위한 오염원단서(source footprint)를 제공할 수 있다. LNAPL과

DNAPL 오염원에서 고분해능 기술은 오염물질 저장(mass storage) 또는 유동(transport) 지역을 도식화하는데 도움이 될 수 있으며, 다소 고비용의 적극적인 방법이라도 오염 부지 조사에 적절히 적용 되면, 오염물질 저장과 유동 지역을 효과적으로 설명하여 오염원 관리 전략에 반영될 수 있다.

대기를 통한 표토의 납 오염 또는 지하 여러 곳에 산재된 폐기물에 의한 지중환경 오염 양상을 갖는 오염원 지역의 경우 오염물질의 정확한 위치와 부피를 측정하는데 불확실성을 가져올 수 있다. IS 기법과 결합된 물리탐사나 수동적인 그리드상 토양가스 측정과 고분해능 특성화 장치는 이러한 오염원을 산정하는데 불확실성을 확실히 줄여줄 수 있다. 즉, 의사결정단위(DU)와 샘플링 설계는 지구물리 혹은 토양가스 특성에 기반을 두어 선정될 수 있다.

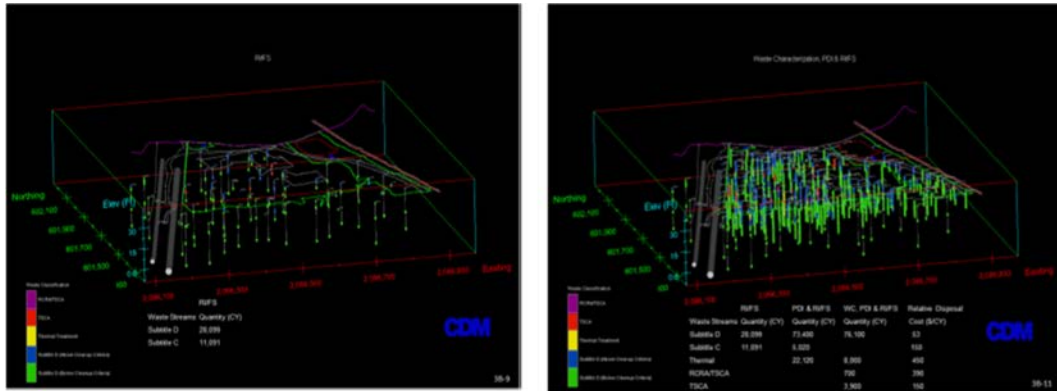
3DVA(3-Dimensional Visualization and Analysis)의 사용은 오염원을 시각화하여 보다 실제적인 CSM을 도출하는데 도움을 줄 수 있다. HRSC를 통해 얻은 밀도 고밀도의 데이터 세트는 이러한 시각화 도구와 잘 부합하고, 복원방법 선택, 설계, 최적화에 도움이 되는 고품질 특성화를 가능하게 한다. 아울러 3DVA는 현장에 대한 지속적인 이해를 제공함으로써 설계팀과 건설팀 사이에 의사소통을 원활하게 한다. 오염복원 설계 임무를 계획하고 범위관리를 할 때, 현장 관리자는 오염원을 설명함에 있어 불확실성을 고려해야 하며, 불확실성을 최대한 줄이기 위한 적절한 고분해능의 분석 도구와 데이터 수집 방법을 적용해야 한다.

Figure 5는 Horseshoe Road Superfund site에서 오염원 범위 산정을 위한 HRSC의 값을 보여준다(<https://cumulis.epa.gov/supercpad/cursites/csinfo.cfm?id=0200781>). 왼쪽의 사진은 HRSC를 사용하기 전의 샘플링 밀도를 보여주고 오른쪽은 HRSC를 사용한 후의 샘플링 밀도를 보여준다. 보다 고밀도의 높은 데이터 세트는 오염물질 종류를 더 명확하게 구분하게 하고 처리 비용을 현저하게 감소시킬 수 있다.

3.5. 수동적 지하수 샘플링(Passive Groundwater Sampling)

다음과 같은 특성을 갖고 있는 현장의 경우 이 전략을 고려해볼 수 있다.

- 얕은 지층 내에 오염된 지하수를 조사하는 경우
- 긴 스크린 간격을 갖고 시추공내 유동역학이 잘 정의된 관측공을 조사하는 경우



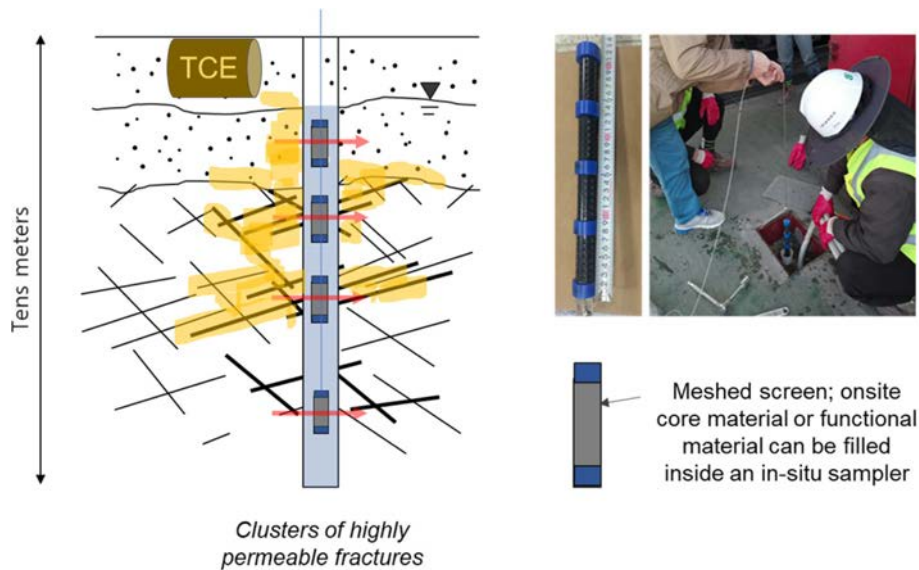


Fig. 6. Passive sampler in series. Concentrations of contaminants and any chemical components in subsurface environments can be determined over a long period of time [US EPA (2018)].

- 퇴적물이 오염된 경우
- 소수성의 비이온성 오염물질(PCB, PAH, dioxins)로 오염된 경우
- 퇴적물-지표수 상호작용을 포함하는 CSM이 필요한 경우
- 오염물질의 생물이용성에 관해 불확실성이 있는 경우
- 독성과 전체 퇴적물 화학특성 사이에 상관관계가 부족한 경우

퇴적물 오염은 Superfund 현장에서 퇴적물, 공극수 그리고 인접한 지표수의 직접적인 샘플링이라는 전통적 방법을 통해 평가되어 왔다. 직접적 샘플링의 기반이 되는 가정은 모든 오염물질은 생물학적으로 이용가능(bio-available)하다는 것이다. 퇴적물 농도에 문제가 있다는 것이 확인될 경우, 생물학적 이용가능성에 대한 더 많은 연구가 필요하다. 지표수와 퇴적물에 대한 수동적 샘플링 방법은 오염물질이 퇴적물로부터 공극수와 지표수로 확산되고 분별되는 것을 기반으로 생물학적 이용가능성을 정량화하는데 사용될 수 있는데, 이를 통해 생태적 위해성 평가에서 불확실성을 줄여줄 수 있다.

수동적인 샘플링은 water column과 퇴적물 간극수 사이에서 오염물질의 농도를 모니터링 할 수 있는 과학적이고 비용-효율적인 기법이고, 퇴적물과 물 사이에서 오염물질의 농도 변화에 대한 정보를 제공할 수 있다. 수동적 샘플러는 용해되어 있고 생물학적으로 이용가능한 오염물질의 농도에 대한 정보를 제공하는데, 그 이유는 샘플러

가 유기물 축적을 위한 대체제(surrogates)로서의 역할을 하기 때문이다. 가장 일반적인 퇴적물 오염물질은 pesticides (살충제), polychlorinated biphenyls(PCBs), PAHs, 낮은 농도로 용해된 chlorinated hydrocarbons(염소화 탄화수소)와 같은 소수성의 비-이온 오염물질이다. 금속성분에 대한 수동적 샘플링 방법은 소수성 유기 오염물질을 위한 방법만큼은 개발되어 있지 않다.

수동적 샘플러는 일반적으로 많은 소수성 오염물질과 비슷한 정도의 소수성을 가지고 있는 플라스틱 중합체(plastic polymer)로 구성되어 있다. 용해되어 있는 소수성 오염물질은 물에서 용출되어 중합체로 분별된다. 시간이 지나면서 오염 물질은 인접한 매체의 농도와 평형을 이룰 때까지 샘플러에 축적된다. 수동적 샘플러는 복원작업 동안과 그 후에, CSM의 도움 하에 퇴적물에서 지표수로 방출되는 오염원을 결정하고 지표수와 퇴적물 간극수 농도를 모니터링하는데 사용될 수 있다.

퇴적물 특성화는 짧은 순간의 변동에 의해 퇴적물이 재부유와 이동이 발생하여 퇴적물 성분이 상대적으로 빠르게 변하기 때문에 복잡하고 어렵다. 이러한 빠른 변화는 지표수에 용해된 오염물질의 농도를 증가시키거나 감소시켜 현장의 평균 농도를 정확하게 반영하기 어렵다. 수동적 샘플러는 시간 평균에 대한 값을 제공하는데, 전통적인 샘플링에 의해 나타내어진 snap-shot 보다는 현장에서의 대표적인 농도를 더 정확하게 반영할 수 있다. 수동적 샘플러의 단점 중 하나는 현장에서 문제가 되는 모든 오

염물질을 측정할 수 있는 것이 아니라 샘플링 매체에 포획될 수 있는 특정 화합물로 사용이 제한된다는 것이다. 추가적으로, 규제기관은 특정한 샘플링 목적을 위한 수동적 샘플러의 사용 전에 비교 시험을 할 것을 요구할 수 있다.

현장 관리자는 오염정화가 효율적으로 진행되는지 뿐만 아니라 오염원 분포 조사를 더 잘 하기 위해서 수동적(퇴적물과 지표수) 샘플러를 사용하여 퇴적물 현장을 평가할 수 있다. 수동적 샘플러가 포함된(오염복원) 계획과 범위 관리에 있어서 생태학자, 화학자 등을 투입하여 데이터를 수집하고, CSM 불확실성을 해결하고자 노력해야 한다.

3.7. 지하수-지표수 상호작용

다음과 같은 현장 특성을 갖고 있는 경우 지표수-지하수 상호작용을 고려해볼 수 있다.

- 지표수와 지하수가 함께 존재하는 경우
- 하나의 매체에서 다른 매체로의 잠재적인 오염물질 이동이 예상되는 경우
- 지표수체에서 지하수 유출(discharge) 지점에 대한 불확실성이 있는 경우
- 지하수와 지표수의 상호작용에 대한 불확실한 CSM이 존재하는 경우

지표수와 지하수가 존재하는 수문학적 시스템에서, 두 매체는 지하수와 지표수의 전이대(transition zone)로 연결되어 있다. 지하수가 지표수로 배출되거나 지표수가 지하수 시스템으로 함양되기도 한다. 전이대에서 오염물질의

운명과 이동을 이해하는 것이 중요한데, 이는 매체 사이의 오염물질의 교환을 나타내며, 이를 통하여 인간 혹은 생태계가 오염에 노출될 수 있기 때문이다. EPA에서는 지하수-지표수와의 상호작용을 이해하는데 특별한 관심을 갖고 있는데, 이는 슈퍼펀드 현장의 거의 절반이 지표수에 영향을 주었기 때문이다.

오염물질의 유동과 화학적 성질을 평가하기 위해 지표수-지하수 상호작용에 대한 조사를 설계한다. 특히, 지하수 오염으로부터 지표수로, 혹은 지표수에서 지하수로의 오염물질 유출의 위치와 규모를 이해해야 한다. 지하수 배출 위치를 확인하고, 수리학적, 화학적, 생물학적 샘플링을 진행하기에 앞서 현장의 일반적인 지형답사(reconnaissance)와 함께 조사와 샘플링 전략이 시작된다. Figure 7은 지하수와 지표수를 이용하여 지하수와 지표수의 상호작용을 평가하는 조사 전략에 대한 한 예시이다.

지표수와 지하수의 수위 데이터를 이용하여 작성한 등수위도는 배출 지역의 일반적인 위치를 알아내는데 흔히 사용된다. 누출 계측기, 열화상도, 지구물리적 도구, 정량적 염료 추적자시험을 포함한 특수 방법이 사용되기도 한다. 온도에 대한 정보도 지하수에서 지표수로의 배출 위치를 도식화하는데 효과적으로 사용될 수 있다. 전방감시적외선 카메라와 광섬유 케이블을 사용한 온도센서도 다양한 규모에서 배출 위치를 도식화하고, 퇴적물, 공극수 및 지표수 샘플링 위치를 최적화하는데 사용된다. 이와 같이, 고분해능과 미세 규모의 분석이 중요한데, 이는 최근

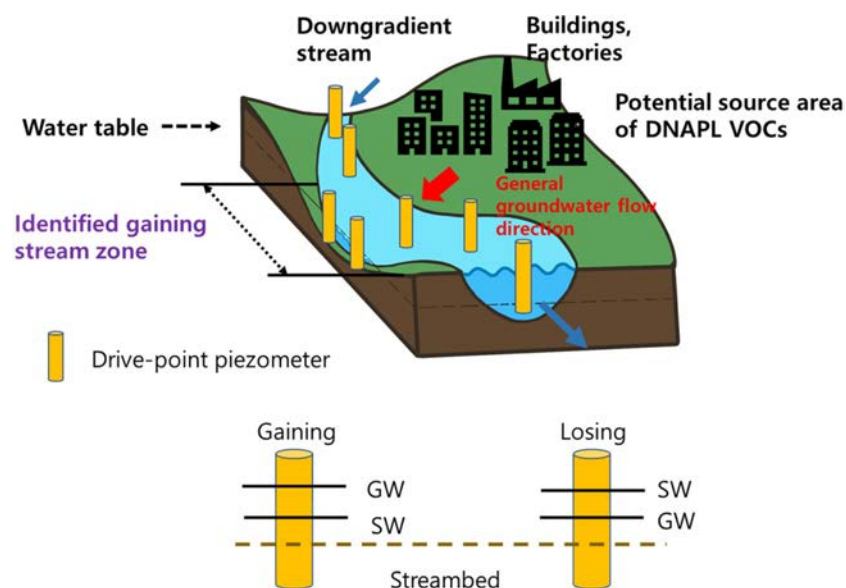


Fig. 7. Example of investigative strategy for groundwater – surface water interface. Gaining and losing stream assessment can help determine whether groundwater discharges to stream and delineate length of gaining area in stream. GW= groundwater, SW= surface water [Figure redrawn from the original in US EPA (2018)].

연구에 따르면 배출 지점이 공간적으로 복잡하고 작으며 쉽게 놓칠 수 있기 때문이다. 유동 패턴이 확립되면, 오염 물질의 플럭스를 평가할 수 있다.

감시공과 다중심도 지표수 샘플링을 사용하는 전통적인 조사방법 뿐만 아니라, HRSC 기술도 의심이 되는 배출 지점에서의 오염물질 플럭스를 확인하는데 적용할 수 있다. HRSC는 균열이 있는 암석이나 불균질한 퇴적물과 같이 매우 작은 규모에서 오염물질이 이동할 때 중요하다. 강기슭이나 지표수 하저 퇴적물 내에서 수동적 샘플러 네트워크를 비용효율적으로 사용할 수 있는데, 이를 활용하여 오염물질의 지표수역으로의 배출 위치와 상대 농도를 빠르게 평가할 수 있다.

하저 퇴적물과 물 사이의 경계면에서의 오염물질 유동의 방향과 속도는 시공간적으로 바뀌며, 따라서 일반적으로 지하수-지표수 경계면의 환경은 복잡하다. 오염물질 플럭스의 규모와 방향이 지표수의 온도와 위치 변화에 따라 바뀔 수 있으며, 이러한 변화를 확인하기 위해서는 시간에 따라 여러 흐름 조건에서의 지하수와 지표수의 샘플링이 필요하다.

지하수와 지표수의 상호작용을 정확하고 완벽하게 기술하는 CSM을 개발하는 것은 위해성 감소와 오염복원 설계에 있어 중요하다. 자연정화의 평가, 차단벽체나 확산방지 시스템의 설계 및 최적 배치 등 정화공법 작용에 있어 배출과 플럭스에 대한 정보가 도움이 된다.

3.8. 증기 침투(Vapor intrusion)

다음과 같은 특성을 갖고 있는 현장의 경우 이 전략을 고려해볼 수 있다.

- 증기를 형성하는 화학물질이 지중에 숨겨져 있거나 혹은 건물 근처에 지하 오염원이 있는 경우
- VOC 흡입 노출에 대한 잠재적인 이동경로를 갖는 경우
- CSM에서 증기침투 이동경로에 대한 분석이 불완전한 경우

증기침투는 지하의 오염원(지하수, 토양 혹은 도관)으로부터 위에 있는 구조물로 위험한 증기가 이동하는 것을 말한다. 전형적으로 증기침투를 일으키는 오염물질은 chlorinated hydrocarbon(염소화 탄화수소), petroleum hydrocarbons(석유계 탄화수소), 그리고 halogenated and non-halogenated(할로겐과 비할로겐의) 휘발성 유기 화합물을 포함한다. 증기침투의 이동경로는 일반적으로 지하수 샘플링, 토양 가스 샘플링, 수동적 토양 가스 조사, sub-slab sampling, 그리고 실내 공기 샘플링을 통해서 다량의 증거를 수집함으로써 평가된다. 완전한 증기 침투 이

동경로 조사를 통해 인간에 대한 노출 가능성을 확인할 수 있다.

미국 EPA는 증기침투에 의한 인체 위해성에 대한 잠재력을 프로젝트 생애주기 내내 평가할 것을 권장한다. 지하의 상태와 증기 이동, 건물의 취약성(building susceptibility), 그리고 생활방식 요소와 지역의 기후 등 여러 요인에 따라 증기침투에 대한 다양한 시나리오가 있다. 이러한 이유로 모든 현장(또는 모든 건물)에 같은 증기침투 평가 기법이 적용되지는 않는다. 가장 좋은 방법은 증기 침투 이동경로를 오염복원 설계에 반영하기 위해서 정화 전주기단계에서 가능한 빨리 전략적 샘플링 프로그램을 발전시키는 것이다.

EPA는 증기침투 평가를 위한 두 가지 일반적 단계를 제시하며, 각각은 전략적으로 접근되어 질 수 있다.

첫째, 인체 위해성에 대한 초기 이해를 위해 이용가능하고 손쉽게 확인할 수 있는 정보를 사용함으로써 예비 평가를 수행한다.

- 전형적으로 초기 현장 평가의 부분으로써 수행됨.
- 전략은 증기포함지역(inclusion zone)을 명시하는데 도움을 주는 데이터에 초점을 맞추는 것.

둘째, 초기 분석 결과가 증기유발 유해물질에 의한 지중환경 오염이 건물의 밑 혹은 근처에 있다는 것을 지시할 때, 정밀 평가가 권장된다(건물은 inclusion zone 내에 있다).

- 일반적으로 현장 조사 단계의 일부로써 수행되지만, 어느 때나 가능함.
- 전략은 정밀조사를 완료하기 위해 필요한 다른 일련의 증거를 우선시하는 것.
- 공간적/시간적 변화를 설명함.

장기간 오염된 지하수 정화 현장부지의 경우 주기적인 검토기간 동안 증기침투도 함께 평가되어야 한다.

증기침투를 위한 샘플링 프로그램은 건물 거주자들에게 영향을 미칠 수 있기 때문에 다소 강력하게 지역사회에 접근하는 노력이 필요하다. 또한 증기 위험의 높은 현장 특이성 때문에, 성공적인 평가를 위해서는 위에 제시한 시나리오의 모든 면을 통합한 정확한 CSM이 필요하다. 시간적, 공간적인 샘플링 데이터는 한 자릿수 또는 그 이상의 규모의 편차로 변화하며, 개별적인 증거는 다른 증거들과 부합하지 않을 수도 있다. 따라서, 전문가가 다양한 증거들을 기반으로 평가하고 의사결정이 이루어져야 한다. 잘 계획된 전략적 샘플링 기법을 통해 위험 한계를 넘은 건물에서만 사용되는 저감전략과 함께, 일반적인 저감조치가 필요한 건물을 알아낼 수 있다.

4. 국내 오염부지 정밀특성화를 위한 전략적 샘플링 기법 적용 사례 및 방안

4.1. 미고결 대수층 지하수의 고분해능 부지특성화

국내는 미고결층 환경의 지하수, 즉 충적층 지하수는 하천 주변을 포함한 국토의 일부분으로 제한되며 깊이가 얕고 전체적인 규모가 작은 편이다. 따라서, 주로 베일러 등을 활용하여 직접 지하수를 채취하거나, 수증펌프 등을 이용하여 지하수를 채취하는 경우가 대부분이다.

한편, Peristaltic pump 등을 이용한 천부지하수의 다중심도샘플링 기법 등이 구제역 침출수, 축산폐수, 비료 사용에 따른 질산성 질소에 의한 농촌지역 지하수의 오염분포 조사 및 평가 등의 연구목적으로 사용되고 있다(Kwon et al., 2017; Moniruzzaman et al., 2018). 비교적 천층의 충적층 지하수일지라도 유기오염물질 농도, 토양유기물의 존재여부, 지하수 유동속도, 지하수내 용존 성분(질산염, 황산염), 철수산화광물 존재형태 및 양 등에 따라 깊이에 따른 물리적, 화학적, 생물학적 특성이 크게 차이가 날 수 있다. 따라서, 다양한 다중심도 채취 기법을 활용한 지하수 오염을 포함한 화학적 특성조사가 필요하다. 아울러 3.1장에서 기술된 바와 같이 국내 오염부지를 대상으로 오염물질의 연속적, 정량적 수직단면 정보를 MIP

또는 LIF와 같은 직접감지장비 등을 사용해서 획득하고, 직관식 시료채취를 통한 전통적인 방식과의 차이를 비교 평가하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

4.2. 단열이 있는 퇴적암 환경에서의 고분해능 부지특성화

국내의 경우 수미터 이내의 천부에서 암반층이 존재하기 때문에 균열 암반에서 정밀부지특성화가 중요하다. 그러나 해외의 경우 이러한 암반 지하수가 상대적으로 적고, 충적층 지하수를 주로 대상으로 하고 있다. 대부분의 국내 연구자 또는 기술자들은 암반층에서도 충적층에서와 비슷한 샘플링 전략을 취하고 있다.

앞서 기술한 바와 같이 MIP 또는 LIF의 경우 센서의 섬세함 때문에 단단한 성질을 가지고 있는 지중환경에 적용하기 위해서는 특별한 주의가 필요할 것으로 판단된다. 국내의 경우 퇴적암은 강원도 태백 등 일부 지역에만 국한되어 있고 대부분 화강암반 등으로 이루어진 단열 암반 지하수가 존재하는데, 이를 보다 정확하고 정밀하게 특성화할 수 있는 기술이 요구된다(Fig. 8). 이러한 기술은 원위치 오염정화뿐만 아니라 고준위 방사성폐기물 처분장 건설을 위한 고심도 지하수를 포함한 심부지중환경 특성화를 위해 중요할 것으로 판단되며 향후 지속적인 연구개발이 필요한 분야이다.

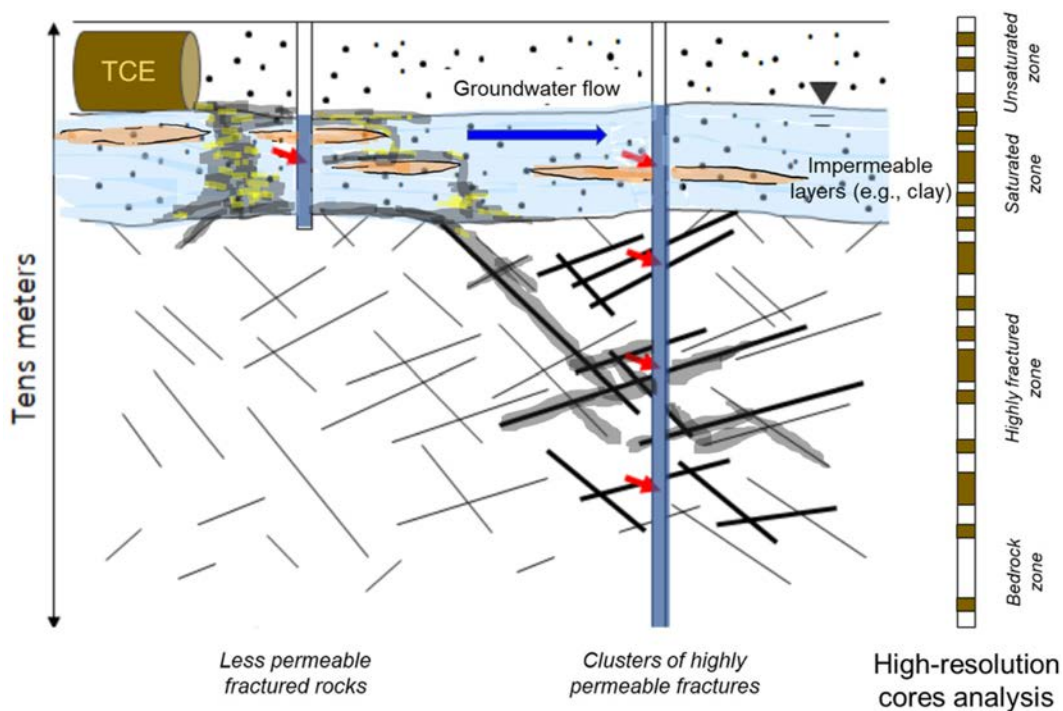


Fig. 8. High-resolution site characterization for trichlorethylene (TCE) contaminated fractured rock environments using borehole groundwater and rock core [US EPA (2018)].

4.3. 증분 샘플링(IS)

국내의 경우 현재까지 IS에 대한 적용은 이루어지고 있지 않으며, 일부 연구목적으로 유사한 개념이 사용되고 있는 실정이다. 토양시료의 대표성을 확인하기 위해 토양의 이용목적(농업 - 지그재그식 시료채취, 또는 산업 - 사방 십자식 시료채취), 조사면적 등에 따른 조사지침이 있으나 개념이 혼동되어 사용되고 있고 대부분 무작위 시료채취(random sampling)가 이루어지고 있다. 유류오염의 수직적인 분포의 경우 냄새 등을 통해 오염농도가 높은 위치를 선택적, 집중적으로 채취하고 있어 오염범위와 오염농도 산정 시 그 대표성에 대한 주의가 필요하다. 따라서 국내 유류오염 또는 중금속 오염지역에 있어서도 오염시료 채취시에 IS에 대한 이해와 고려가 필요하며 이에 대한 비교실증연구가 필요할 것으로 판단된다.

4.4. 오염원 범위 산정

국내 오염원 범위 산정은 대부분 오염원, 불포화대에 한정되어 있으며, 앞서 기술한 바와 같이 고밀도 지중환경 특성화가 아닌 체계적이지 못하고 산재된 데이터를 바탕으로 한 오염범위 산정 방식, 그리고 미지(unknown)의 구간에 대한 단순 추정에 기반한 오염범위 산정방식을 따르고 있다. 이러한 부정확한 오염원 범위 산정으로 인해 정화설계 및 정화비용산정이 추가로 필요하게 되는 경우가 빈번하여 분쟁의 요인이 되고 있다. 아울러 지하수 오염범위 산정에 대한 산정에 대한 국내 조사 및 연구사례는 미흡하며, 보다 정량적인 측정과 함께 오염범위 산정을 위한 모델링 기술 개발이 필요하다. 특히 국내 지중환경의 대수층 상세구분 및 복잡한 수리지질 특성 부여를 통한 보다 정확한 대수층별 오염량 및 범위 산정이 요구된다.

4.5. 수동적 지하수 샘플링

국내의 경우 일부 연구자들에 의해 수동적 지하수 샘플링이 이루어졌으나, 실제 지하수 샘플링 및 시간에 따른 지하수 수질 변화를 목적으로 수동적 지하수 샘플링이 실시된 바는 전무하다. 최근 국내외에 다양한 수동적 샘플링 기법이 개발 및 적용되고 있다. 특히 국내의 경우 디젤 오염토양의 원위치 정화공법 정화효율 모니터링 기법으로 사용된 바 있다(Kwon et al., 2017). 펌프나 베일러 등 능동적 샘플링 기법으로 채취된 지하수 시료 내 존재하는 유류오염물질 등의 농도는 과도한 펌핑이나 교란으로 인해 과평가될 수 있으며, 토양표면에 흡착되어 존재하는 오염물질의 농도를 분석할 수 없었다. 그러나 수동적 샘플링 기법을 통해 실제 지하수에 존재하는 오염물질

농도를 대표할 수 있는 심도별 시료 채취가 가능하며 토양 시료도 함께 채취가 가능하다는 장점을 보였다. 아울러, 오염물질의 중장기 모니터링을 통해 정화공법 적용의 실효성을 평가하는 도구로도 활용 가능할 것으로 판단된다(Fig. 6).

4.6. 지표수와 퇴적물에 대한 수동적 샘플링

국내의 경우 하천수와 하천퇴적물에 대한 연구는 토양지하수 오염정화를 다루는 환경 전공자 보다는 해양전공의 연구자들에 의해 주로 다루어졌다. 그러나, 하천수와 하천퇴적물 역시 토양지하수와 밀접한 연관성을 갖고 있기 때문에 토양지하수 관련 전공자의 관심이 필요하다. 호소수의 심도별 능동적 샘플링, grab 방식을 사용한 하상 퇴적물 능동적 샘플링이 주로 이루어지고 있으나, 시기별 모니터링을 목적으로 할 경우 시료채취 위치의 미세한 변동으로 인한 시료의 불균질성 및 미세오염물질농도의 변동을 감지하기 어렵다는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 diffusive gradient in thin film (DGT)을 사용한 퇴적물 내 유기 오염물질의 시계열 모니터링 연구가 수행 중에 있으며 향후 하천 유기오염물질의 중장기 모니터링 연구를 위해 적극적으로 활용되어야 할 것으로 판단된다(Noh et al., 2020).

4.7. 지표와 지하수의 상호작용

자연환경에서의 물순환은 물과 오염관리에 있어 매우 중요한 개념이다. 특히, 지표수와 지하수는 끊임없이 상호작용하는 하나의 수체를 이룬다. 특정 부지에서 배출된 오염물질은 토양의 특성에 따라 조절되는 침투과정을 거쳐 지하수에 도달하며, 결국 반드시 중간 및 기저유출에 의해 시차를 두고 인접 지표수계로 유입된다. 지표수와 지하수를 아우르는 물순환을 고려하지 않고서는 지표수의 물관리가 이루어질 수 없다. 그동안 우리나라에서는 지하수를 통한 지표수계로의 오염물질 유출에 대해 무관심하거나 지식이 부족하였다. 최근 발간된 연구결과를 보면, 국내 4대강 수계의 기저유출지수(BFI, 하천유출량 중 지하수 기여도)는 62~86%에 이른다(최윤호 등, 2014; 이승찬 등, 2017). 국내 254개 하천관측망 자료의 해석 결과에서도 28~89%(관측망 64%에서 50% 이상)에 이르는 것으로 재평가되었다(Jung et al., 2016). 특히, 지중환경 오염이 보다 빈번한 도시지역에서의 물순환은 불투수성 지표의 증가와 더불어 매우 왜곡되고 있어 도시하천의 건천화 등이 나타나고 있다. 따라서 지중환경의 오염이 지표수 및 지표생태계에 미치는 영향을 비중 있게 고려해야

하며, 이를 위해서는 EPA에서 지적인 바와 같이 지표수-지하수 상호작용에 관한 조사평가가 체계가 기술적, 제도적으로 확립되어야 한다.

국내에서의 지표수-지하수 상호작용에 관한 연구개발은 최근 일부 지하수 전문가를 중심으로 일부 하천을 대상으로 지하수 특성 관측(수위, 온도, 이온함량 등)에 의존한 제한적 평가만이 이루어졌다(예: Oh et al., 2017; Jung et al., 2019). 미국 EPA에서 제시한 바와 같이, 두 수체 간의 경계지역에서 발생하는 시공간적으로 매우 복잡한 상호작용을 올바르게 파악하기 위해서는 다양한 조사기법이 융합 적용되어야 한다. 즉, 지질, 수리지질, 지구물리, 지구화학 기법을 융합 적용하는 합리적 지하수 유출량 평가기법 확립이 필요하며, 이를 기반으로 지표수-지하수 연계 부지 오염물질 모델링 기술이 개발되어야 할 것이다. 아울러 아직 국내의 토양오염 정화에 있어서는 오염토양 하위에 분포하는 지하수의 오염에 대한 고려가 매우 부족한 상황이며, 따라서 토양오염에 의해 유발된 지하수오염에 의한 지표수계의 영향을 반드시 고려하는 인식의 전환이 시급하다.

4.8. 증기 침투

국내의 경우 가스상 물질의 샘플링 기법 및 분석상의 까다로움으로 인해 유류오염부지 등에서 증기침투를 비중 있게 고려하고 있지는 않다. 아울러 기체상 물질의 경우 큰 이동성을 갖는 특성상 가스상 물질의 시료채취 시기 및 방법 등에 따라 큰 차이를 보이게 된다. 따라서, 휘발성 기체의 분석에 대한 표준 절차 및 공인인증 필요성이 필요하며, MIC 등을 사용할 경우 기존의 수동적 기체샘플링 후 실내 기기분석을 통한 결과와 비교 검증이 필요할 것으로 판단된다.

메탄이나 수소기체의 경우 말단전자수용과정을 분석하기 위해 필수적인 요소이기는 하나 국내에 제대로 적용된 사례는 드물다. 본 논문과 함께 특별호에 게재된 ‘오염 지중환경 특성화와 자연저감평가를 위한 말단전자수용과정(TEAPs) 분석 및 평가기술 소개’ 논문에서는 이러한 말단전자수용반응의 정량 및 정성평가의 필요성과 함께 방법 및 사례를 상세히 소개하였다. 고심도 또는 도심 등 지중환경정화를 위해 자연저감공법의 중요성이 증대되고 있으며 이를 위해 이러한 가스성분 분석과 평가, 해석이 필요할 것으로 판단된다.

5. 요약 및 결론

미국 수퍼펀드 사이트 등 다양한 오염부지를 대상으로

수십년 간에 걸쳐 축적된 미국 EPA의 전략적 샘플링 기법을 소개하였다. 모든 오염부지에 동일하게 적용되는 샘플링 기법이 아닌 현장 각각의 조건에 따라 다른 최적의 샘플링 기법을 적용해야 한다. 특히 층적층 등에 존재하는 지하수와 균열 암반층 지하수 오염을 평가하기 위한 샘플링 전략에는 분명한 차이가 존재한다. 특정 오염부지에 적합한 전략적 샘플링을 통한 고밀도 정밀 특성화를 통해 오염정화 성공가능성이 향상될 뿐만 아니라 동시에 비용적인 측면에서도 유리함이 실제 사례를 통해 밝혀졌다. 한편 최근 미국에서 대두되고 있는 증분샘플링은 시료의 대표성을 확보하기 위해 필수적임을 강조한다. 또한 토양오염은 반드시 긴 시간에 걸쳐 지하수오염으로 직결되며, 결국 기저유출(지표수로 유출되는 지하수)을 통하여 지표수의 주요 오염원으로 연결됨을 유의하여야 한다. 따라서, 오염부지 조사평가 및 정화에 있어 지하수의 오염 개연성을 보다 면밀하게 규명하기 위하여 지하수오염 조사 및 정화가 확대되어야 하며, 다양한 기법을 융합 적용하는 지표수-지하수 상호작용 조사평가기술이 확립되어야 한다. EPA 전략적 샘플링 기법을 바탕으로, 국내 오염부지조사 및 최적의 CSM 수립을 위한 국내 실정에 맞는 전략적 샘플링 기법에 대한 심도 있는 이해와 고려가 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부 재원으로 환경산업기술원의 지중환경 오염위해관리기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(과제번호: 2018002440002).

References

- 이승찬, 김희연, 김효정, 한정호, 김성준, 김중건, 임경재, 2017, 다양한 기저유출 분리 방법을 이용한 4대강 수계의 시간대별(연·계절·월) 기저유출 기여도 분석, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, **59**, 1-11.
- 최윤호, 박윤식, 류지철, 이동준, 김용석, 최중대, 임경재, 2014, 수계별 주요 유량 지점에 대한 강수량과 기저유출 기여도 분석, *Journal of Korean Society on Water Environment*, **30**, 441-451.
- IAEA, 2004, Soil sampling for environmental contaminants, International Atomic Energy Agency, IAEA-TECDOC-1415.
- ITRC, 2012, Incremental Sampling Methodology, ISM-1, Washington, D.C.
- Jung, Y., Shin, Y., Won, N.I., and Lim, K.J., 2016, Web-based BFlow system for the assessment of streamflow characteristics

at national level, *Water*, **8**, 384. doi:10.3390/w8090384

Jung, Y.Y., Koh, D.C., Yoon, Y.Y., Kwon, H.I., Heo, J., Ha, K., and Yun, S.T., 2019, Using stable isotopes and tritium to delineate groundwater flow systems and their relationship to streams in the Geum River basin, Korea, *Journal of Hydrology*, **573**, 267-280.

Kim, H.R., Kim, K.H., Yu, S., Moniruzzaman, M.d., Hwang, S.I., Lee G.T., and Yun, S.T., 2019, Better assessment of the distribution of Pb and As in soils in a former smelting area, using ordinary co-kriging and sequential Gaussian co-simulation of portable X-ray fluorescence (PXRF) and ICP-AES data, *Geoderma*, **341**, 26-38.

Kwon, J.C., Lee, G., Kim, T.S., Yoon, J.-K., Kim, J., Kim, Y., Kim, J., and Choi, J., 2016, 정화 보조지표와 시료 채취 방법 제안을 통한 토양정화검증 제도 개선 연구, 지하수토양환경, **21**(6), 179-191.

Kwon, M.J., O'Loughlin, E., Ham, B., Hwang, Y.H., Shim, M., and Lee, S., 2018, Application of an in-situ soil sampler for assessing subsurface biogeochemical dynamics in a diesel-contaminated coastal site during soil flushing operations, *Journal of Environmental Management*, **206**, 938-948.

Kwon, M.J., Yun, S.-T., Ham, B., Lee, J.-H., Oh, J.-S., and Jheong, W.-W., 2017, Impacts of leachates from livestock carcass burial and manure heap sites on groundwater geochemistry and microbial community structure, *PLoS ONE*, **12**(8):e0182579.

Moniruzzaman, M., Lee, J.-H., Jung, K.M., Kwon, J.S., Kim, K.-H., and Yun, S.-T., 2018, Lithologic Control of the Hydrochemistry of a Point-Bar Alluvial Aquifer at the Low Reach of the Nakdong River, South Korea: Implications for the Evaluation of Riverbank Filtration Potential, *Water*, **10**, 1763.

Noh, S., Kim, Y., Kim, H. Seok, K., Park, M., Bailon, M.X., and Hong, Y., 2020, The performance of diffusive gradient in thin film probes for the long-term monitoring of trace level total mercury in water, *Environ Monit Assess*, 192, 66.

Oh, Y.Y., Yun, S.T., Yu, S., and Hamm, S.Y., 2017, The combined use of dynamic factor analysis and wavelet analysis to evaluate latent factors regulating complex groundwater level fluctuations in a riverside alluvial aquifer, *Journal of Hydrology*, **555**, 938-955.

Parker, B.L., Cherry, J.A., and Chapman, S.W., 2012, Discrete fracture network approach for studying contamination in fractured rock, *AQUA Mundi*, **3**, 101-116.


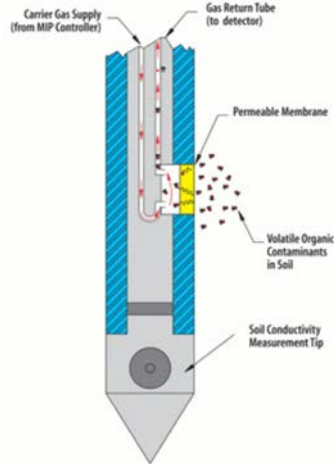
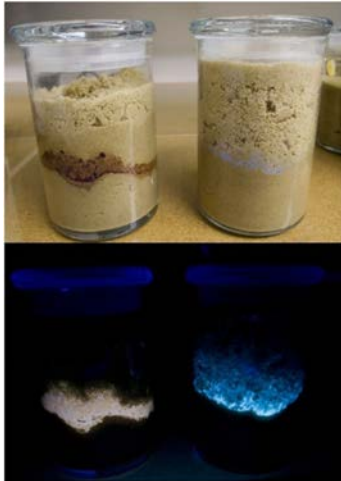
Persaud, E., Levison, J., Pehme, P., Novakowski, K., and Parker, B., 2018, Cross-hole fracture connectivity assessed using hydraulic responses during liner installations in crystalline bedrock boreholes, *Journal of Hydrology*, **556**, 233-246.

Swyngedouw, C., 2018, Chapter 2 - Sampling Methods for Site Characterization, Editor(s): Benedetto De Vivo, Harvey E. Belkin, Annamaria Lima, Environmental Geochemistry (Second Edition), Elsevier, 13-24 (<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63763-5.00003-3>) US EPA, 2016. Groundwater High-Resolution Site Characterization Course. CERCLA Education Center (<https://clu-in.org/characterization/technologies/hrsc/hrsctraining.cfm>)

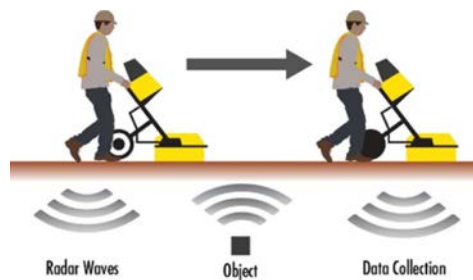
US EPA, 2018, Strategic sampling approaches technical guide, EPA 542-F-18-005, 2018 (<https://semspub.epa.gov/work/HQ/100001800.pdf>)

Appendix

Appendix 1. Implementing advanced site characterization tools

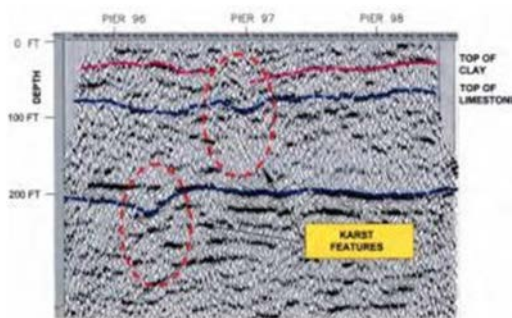
Tool	Figure and resource link	Purpose
Forward looking infrared camera (FLIR)	 <p>https://www.usgs.gov/mission-areas/water-resources/science/handheld-thermal-imaging-cameras-groundwatersurface-water?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Localize groundwater discharge, help characterize local hydrogeologic conditions, and optimize sampling and monitoring locations (지하수 배출 지점을 알 수 있고, 지역에 대한 수리지질학적 특성을 나타내는데 도움이 되며 샘플링 장소와 모니터링 장소를 최적화할 수 있음)
Membrane interface probe (MIP)	 <p>https://clu-in.org/characterization/technologies/mip.cfm</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Monitor the concentration of subsurface contaminants in real time (지중환경 오염물질 농도 실시간 감지) - Use it to analyze qualitative contaminants data when the researchers want to know the vertical distribution of contaminants (오염물질의 현장 분석과 수직적인 분포를 알고 싶을 때 안정적인 오염물질 데이터를 얻는 방법으로 사용됨)
Laser induced fluorescence (LIF)	 <p>https://clu-in.org/characterization/technologies/lif.cfm</p>	<ul style="list-style-type: none"> - A method for real-time, in situ field screening of residual and non-aqueous phase organic contaminants in undisturbed vadose, capillary fringe, and saturated subsurface soils and groundwater (교란되지 않은 불포화층, 모관수층, 포화된 지하 토양과 지하수에 있는 잔여물과 비수용성 유기 오염물질에 대해서 실시간으로 원위치 시크리닝하는 방법) - To provide highly detailed, qualitative to semiquantitative information about the distribution of subsurface contamination that fluoresces, like petroleum products containing polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) (Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)을 포함하는 petroleum 제품같은 형광을 내는 지하 오염물질의 분포에 대하여 정량적 혹은 반정량적인 정밀 정보를 얻을 수 있음)

Appendix 1. Implementing advanced site characterization tools



<https://www.kci.com/resources-insights/innovator/ground-penetrating-radar-as-part-of-sue-and-damage-prevention/>

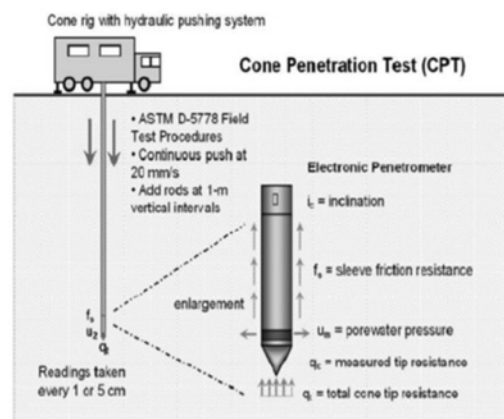
Ground penetrating radar (GPR)



<http://geoviewinc.com/case-studies/geological/geotechnical/seismic-reflection-seismic-crosshole-and-ground-penetrating>

- Geophysical method which has been developed for shallow, high-resolution, subsurface investigations of the Earth (천층 지중환경을 고분해능으로 조사하기 위해 개발된 지구물리학적 방법)
- Use high frequency pulsed electromagnetic waves to acquire subsurface information. Energy is propagated downward into the ground and is reflected back to the surface from boundaries at which there are electrical property contrasts (GPR은 지하의 정보를 얻기 위해서 높은 진동수의 펄스상 전자기파를 사용함. 에너지는 땅 아래로 전파되고 전기적인 성질이 반대되는 경계면으로부터 지표면으로 반사되어 돌아옴)

Cone penetrometer testing



<https://www.americangeoservices.com/cone-penetration.html>

- Determine the geotechnical engineering properties of soils and delineating soil stratigraphy (토질공학 적 특성을 결정하고 토양 층상구조를 기술하기 위해 사용)

Polyethylene diffusion bags

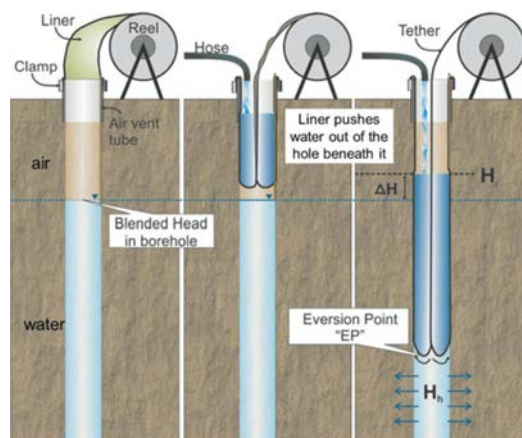


<https://www.itrcweb.org>

- A low density polyethylene bag which is filled with deionized water and it is worked as the semi-permeable membrane. And it collects the samples manually (초순수로 채워진 저밀도의 polyethylene bag이며, 반투과막으로써 작용하여 지하수 샘플을 수동으로 수집)
- VOCs in groundwater can be diffused across the bag until the concentration in the bag is equilibrium with the groundwater which is around (Bag 안에 있는 성분 농도가 주변지하수와 평형에 도달할 때까지 지하수 중의 VOCs가 bag을 통과하여 확산됨)

Appendix 1. Implementing advanced site characterization tools

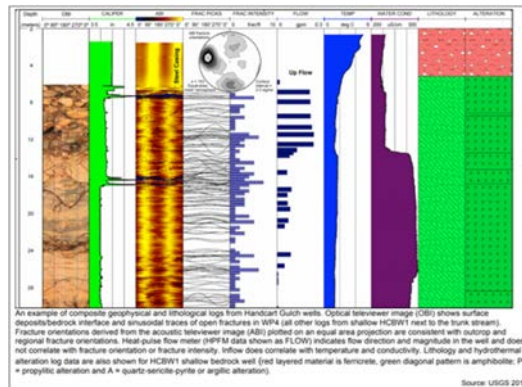
Borehole liners



<https://g360group.org/home/highlights/technologies/flute-flexible-liners/>

- Used to seal the borehole to prevent cross connection between zones of different hydraulic head and used to measure water permeability and groundwater flow in depths(시추공을 밀봉하여 교차오염을 막을 수 있고, 투수성과 지하수 유동을 깊이별로 측정할 수 있음)
- Measure the high resolution of hydraulic conductivity and temperature of groundwater which is in equilibrium state(라이너 내부의 안정한 상태에 있는 지하수에 대한 수리 전도도와 온도를 고분해능으로 측정할 수 있음)

Acoustic and optical viewers



https://clu-in.org/contaminantfocus/default.focus/sec/Fractured_Rock/cat/Characterization/

- Provide the digital figures as rotatory core(difficult to work in turbulent flow)(Optical viewer는 회전 가능한 코어로써의 디지털 그림을 제공 (난류에서 작동이 어려움))
- Digitalize the sound wave which is reflected from borehole wall(Acoustic viewer는 시추벽에서 튕겨져 나온 음파를 디지털화한 것임(주시 및 진폭자료 사용))

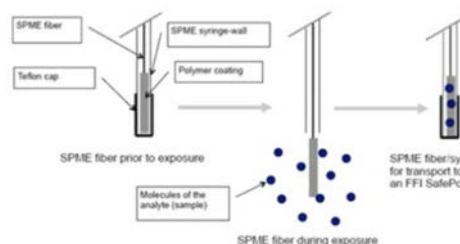
Caliper logs



<http://www.sparteksystems.com/MFC.aspx>

- Measure the internal radii of the wellbore tubing and casing continuously(시추공 깊이와 함께 시추공의 크기와 모양을 지속적으로 측정할 수 있는 logging 도구)
- Used in hydrocarbon exploration when drilling wells(일반적으로 well을 뚫고 탄화수소류를 탐사하는 용도로 사용)

Solid phase micro-extraction samplers



<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=10727>

- Coated with a liquid(polymer), a solid(sorbent), or a combination of both. (액체(폴리머) 혹은 고체(흡착제)인 추출물질로 싸여있는 섬유를 이용하는 방법으로, 매체를 이용하여 서로 다른 종의 분석 물질(휘발성과 비휘발성 같은)을 추출 가능)
- The fiber coating extracts the compounds from the sample by absorption in the case of liquid coatings or absorption in the case of solid coatings(흡착과 탈착의 원리를 이용)