

휘발성유기화합물 (VOCs) 오염의 세밀조사 장비 개발 및 현장적용

강치구*

1. 서론

토양오염은 오염경로의 다양성, 피해발현의 완만성, 오염의 비인지성 및 타 환경인자사이의 영향관계 모호성, 원상복구의 어려움 등으로 인해 심각한 환경문제임에도 불구하고 발견이 비교적 쉬운 수질 및 대기오염에 비해 사회적 관심을 덜 받아왔다. 그러나 최근 미군기지 이전에 따른 유류 오염의 처리, 폐광산 주변의 중금속 오염, TCE, PCE에 의한 지하수 오염 등 과거 급속한 산업 발전에 기인된 피할 수 없는 오염현상이 새로 개정된 토양환경 보전법에 따라 오염 원입자의 책임 소재 규명과 복원의 의무로 인해 더 이상 미룰 수 없는 중요한 환경문제로 인식되고 있는 실정이다.

인구 증가와 산업의 고도 발전은 토지의 수요를 급증시켰고 과거 매립지, 공장부지, 폐광산, 군기지 등도 주택단지와 산업단지로의 개발이 꾸준히 계속되고 있다. 그러나 토지거래와 개발 시 오염조사와 정화 그리고 복원 비용의 부담이 오염 유발자에게 지워지게 되며, 오염 발견 시 매도자는 정화 후 거래하거나 매수자가 오염 복원 비용만큼 토지가격의 할인을 요구하고, 만약 오염을 인지하지 못하고 인수하게 되면 모든 토양오염 복원의 책임이 매수자에게 있게 되며 이 경우 자산 담보 가치 등 부동산의 경제적 가치 손상이 막대하게 되므로 앞으로 토지거래를 할 경우, 세밀한 환경영향평가 또는 조사가 필수적이다.

현재 고도화된 산업구조의 발전과 변화에 따른 토

양 오염원의 종류도 과거 중금속 등의 무기물질에서 유류, 휘발성 유기염소계 화합물(VOCs), PCB, 농약 등의 유기물질에 의한 오염으로 관심이 이동 중에 있다. 비중이 큰 중금속은 용해도가 낮고 토양에서의 확산속도가 완만하여 확산 범위가 크지 않고 일정 범위에 머무르는 경향이 크지만, 유기염소계 화합물(VOCs)은 용해도와 분해성이 높아 지하수의 유동에 따라 오염 분산이 확대되는 경향이 강해 오염 범위의 조사와 복원이 쉽지 않다. 따라서 토양 표층에 잔류하기 쉬운 유류 오염에 비해 휘발성 유기염소계 용제에 의한 토양 및 지하수 오염은 기존의 조사 방법과는 다른 신기술의 개발이 요구되고 있는 실정이다.

2. 유기염소계 화합물에 의한 토양·지하수 오염

우수한 세정제로서 기계부품 세정과 드라이클리닝 등 넓은 분야에서 사용되고 있는 테트라클로로에틸렌(PCE)과 트리클로로에틸렌(TCE)은 물보다 비중이 크고(DNAPL : 重非水液, dense non-aqueous phase liquids) 점성도가 적어 세제로서 이상적이지만, 이러한 물리적 특성으로 인해 땅속에서 깊고 넓게 오염이 확산되고 있다. 유류저장 시설에서 누출된 석유류는 물보다 비중이 낮아 토양에 잔류하거나 오염운(plume)으로 떠있는 반면, TCE/PCE 같이 비중이 큰 오염물질은 지하수에 일정부분 용해되고 나머지는 지하수면 밑에 오염운을 형성하여 대부분이 표토층을 중심으로 진행되던 기존의 조사방법으로는

* (주) 토양오염 정화기술 대표이사

VOCs에 의한 오염실태를 파악하는데 한계가 있다.

외국의 경우 일본 지바현 군진시(君津市) 반도체 공장, 미국 실리콘밸리의 반도체 공장 주변의 토양 및 지하수 오염이 전형적인 예로서 오래전부터 휘발성 유기염소계 용제에 의한 오염의 심각성이 사회문제가 되어 왔으나, 우리나라는 2002년 1월부터 토양환경보전법에 TCE와 PCE를 새로운 토양오염물질로 지정하여 관리하고 있으며 전자부품, 반도체 생산 공장, 드라이클리닝 관련 사업장 주변의 오염의 심각성이 예상된다. 화학적 안정성으로 인해 사용 중 분해 되지 않는 PCE와 TCE는 자체의 독성도 문제지만, 토양과 지하수로 침투한 후 서서히 분해 되면 이때 생성된 이클로로에틸렌 3종류는 100배 정도의 발암성을 갖게 되어 그 위험성이 더 커지게 되므로 오염대책이 시급한 실정이다. 종래에는 안정하여 적절한 관리가 이루어지지 않았으나 용제로서의 우수성으로 인해 대량으로 사용된 실정에 비추어 볼 때 PCE/TCE 등의 휘발성유기화합물에 의한 토양, 지하수 오염의 조사와 복원의 중요성은 더욱 커진다.

3. 유류 및 휘발성 유기염소계 화합물 오염의 조사

물보다 비중이 큰 PCE, TCE 등의 DNAPL은 지하수 내에 침강하여 지하수 유동에 의해 오염이 확산·확대되므로 정확한 오염원의 파악이 쉽지 않지만, 휘발성 물질은 땅 속에서 기화하여 지표면까지 도달하는 경우가 많아 표층 토양가스 조사에 의해 오염의 존재 유무와 평면분포는 쉽게 파악할 수 있다.

유류오염의 경우는 표층 토양이나 지하수면 위에 잔류하므로 유류성분인 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌(BTEX)과 총석유계탄화수소(TPH) 농도분포를 조사하여 유류오염의 존재 유무와 분포를 조사할 수 있다.

3.1 토양 가스 조사

유류 및 유기염소계 용제에 의한 오염의 경우 휘발성 물질이 땅 속이나 지하수에서 기화하여 지층까지 도달할 수 있으므로 표층토양에 깊이 0.5m - 1m 정도의 공을 삭공하고 토양 가스를 흡인하여 가스 검지관으로 분석하며, 토양오염의 가능성 유무 판단과 오염의 평면 분포를 쉽게 파악할 수 있다.

일본에서 개발되었으며 당사가 현재 사용하고 있는 토양오염 측정기(그림 3)를 이용, 표층토양을 삭공하지 않고 지표면 위에서 토양가스를 포집하여 현장에서 휘발성 물질의 농도와 평면분포를 조사하는 방법이 있다. 이 경우에는 지표면이 아스팔트나 콘크리트로 피복되어 있어도 공을 뚫을 필요가 없어 가동 중인 산업체의 작업면이나 전력, 가스, 통신 등의 매설물을 파손하지 않는 장점이 돋보인다. 토양가스 조사는 표층부근에 도달한 가스를 대상으로 하여 보링에 드는 노력을 최소화할 수 있으므로, 적은 비용으로 많은 공을 조사할 수 있는 장점이 있는 반면, 토양 시료를 직접 채취하고 GC(Gas Chromatograph)로 분석하여 얻은 오염물질의 농도에 비해 상대치여서 조사지역내에 대한 토양오염 가능성 유무를 판단하고 토양가스가 고농도로 검출되는 지점(hot spot의 가능점)을 파악하는데 활용되는 개량조사의 성격으로 사용할 수 있다. 그러나 고농도의 토양가스가 검출된 지점을 중심으로 가스시료 채취 mesh를 1~2m간격까지 세밀하게 하여 시료밀도를 높일 수 있어 토양가스의 등농도 contour 작성을 통해 최고농도 지점 및 전층의 토양오염 평면 분포를 정확히 파악할 수 있다(그림 1과 2).

3.2 보링조사

표층토양가스 조사가 오염존재 유무와 평면적 오염분포 파악을 목적으로 하는 것에 비해 보링조사는 심도별 오염분포 파악, 토양의 지질적, 물리적, 수리학적 특성 파악, 오염농도의 절대치 조사가 가능하여

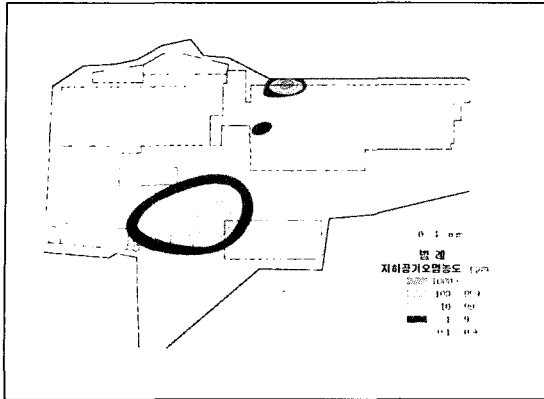


그림 1. 고감도 수법으로 행한 지하공기 오염 조사 결과
(메쉬 간격이 넓어서 잘못된 사례: 28지점 샘플링)

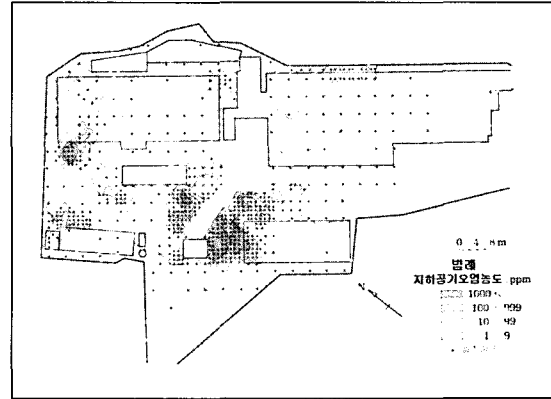


그림 2. 토양 가스 채집기로 조사한 결과
(메쉬를 세밀화하여 606지점 샘플링)

표층 토양가스 조사가 병행될 경우 3차원적인 오염 분포 상황을 파악 할 수 있다. 최소인원으로 하루에 수백 공의 조사가 가능한 표층토양 가스 조사에 비해 노력과 비용이 커서 시료채취 mesh를 세분화할 수 없는 단점이 있다. 따라서 표층토양 가스 조사를 통해 파악된 hot spot 파악을 중심으로 메쉬 간격을 세분화하면 효과적인 오염조사가 가능하다. 특히 지하수로 침투하여 함께 이동하는 VOCs(PCE, TCE 등)의 경우 메쉬 간격이 큰 경우 정확한 hot spot의 위치를 파악하기 힘들어 보링조사의 전 단계로 표층 토양 가스 조사가 꼭 필요하다.

오염 복원의 전체 비용을 줄이기 위해서는 정확하고 효율적인 조사방법을 통해 오염 plume과 hot spot의 위치를 정확히 파악하는 것이 중요하다. 따라서 시료채취밀도를 저비용으로 높이는 것이 중요한데 보링의 경우로 차량탐재형의 비교적 대형 보링 장비(예 : Geoprobe)는 작업의 신속성과 경제성이 떨어져 많은 지점을 조사하기 어렵다. 그러므로 소형이며 인력에 의한 이동이 간편하고 좁은 장소나 옥내 등 장소에 구분 없이 샘플링이 가능하며 토양시료 코어(core)가 비교적 상태로 채취가 가능한 토양 샘플러가 필수적이다.

4. 비파괴식 토양가스 채집기/토양 오염 조사 굴착기

휘발성 유기염소계 화합물에 비해 상대적으로 이동성이 작은 중금속에 의한 토양 오염 조사는 30m 메쉬 간격으로 조사하는 것이 원칙이다. 그러나 휘발성 유기염소계화합물 중 DNAPL(重非水液 : TCE, PCE 등) 같은 오염물질은 지하수와 함께 이동하거나 자체 휘발에 의해 복잡한 지층구조를 따라 분포하므로 보다 세밀한 조사가 필요하다. 전체 복원에 드는 총 비용을 절감하기 위해서는 정밀한 오염분포 파악과 오염 기구 해명을 토대로 복원 설계를 해야 가능하므로 세밀조사의 중요성이 강조된다. 차량탐재형 보링머신으로 토양을 굴착하여 시료를 채취하고 이를 실험실로 운반하여 Gas Chromatograph로 오염농도를 측정하던 종래의 방법은 경제성 및 신속성의 문제로 인해 세밀한 메쉬를 구성하여 조사하기 어려워 정확한 오염분포를 파악하기 쉽지 않다. 따라서 오염물질이 유류 또는 휘발성 유기염소계화합물인 경우 토양을 삭공하지 않고 지상에서 지하공기를 채취하여 검지관에 의해 토양 중 오염물질 농도를 현장에서 신속하게 측정하면 짧은 시간에 세밀한 메쉬에서의 측정작업이 가능하여 훨씬 정확한 오염평면분포를 파악할 수 있다.

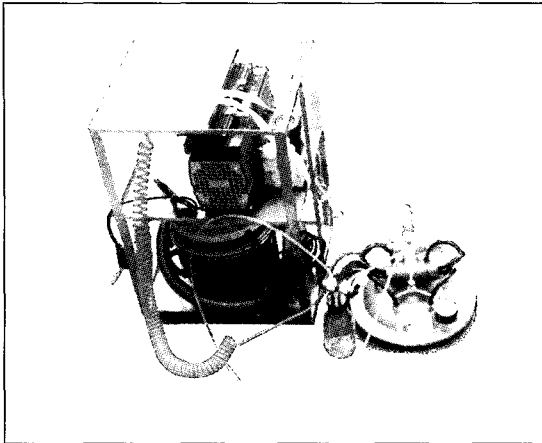


그림 3. 비파괴식 토양가스 채집기

따라서 오염존재유무, hot spot의 위치, 그리고 정확한 평면 오염 분포를 파악하게 되면 개황조사로서의 필요 충분 조건을 만족하게 된다. 최소인원으로 이동 및 조작이 간편하고 좁은 장소에서도 작업이 가능한 굴착장비를 써서 토양 시료와 토양 가스를 교란 없이 채취하고 검지관 또는 Gas Chromatograph로 분석하면 심도별 오염 분포 파악이 가능하여 3차원적인 오염 범위를 확정할 수 있게 되어 정확한 오염 조사가 완결되고, 결과적으로 총복원비용의 상당 부분을 절감하는 효과를 얻게 된다.

4.1 비파괴식 토양가스 채집기

토양을 굴착하거나 삭공하여 토양가스를 채취하던 기존 방식에 비해 비파괴식 토양가스 채집기는 토양을 굴착하지 않기 때문에 뛰어난 기동성과 간편성을 가져 하루에 100여공 이상의 조사가 가능한 효율적인 기술이다. 현재 일본과 국내의 특허 출원중인 신고안 장치로서 현장에서 검지관을 사용하여 농도 측정이 가능하며 신속하고 정확한 평면 오염분포 파악이 가능하다.

■ 특징

- 1) 비파괴식이므로 지면이 아스팔트 또는 콘크리트

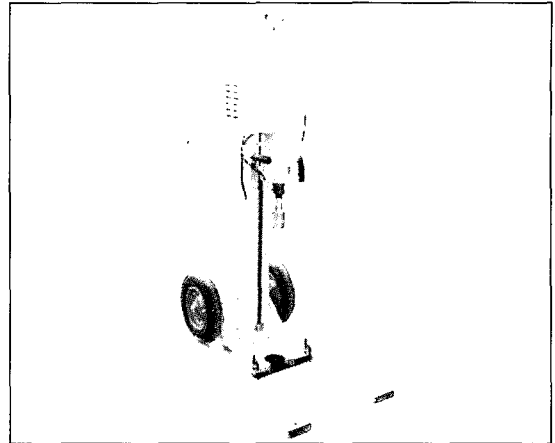


그림 4. Portable Drill

트로 피복되어 있어도 원지면을 삭공 등에 의한 훼손 없이 토양가스 채취 및 오염물질 농도 측정 가능

- 2) 한 측정지점 당 3분 이내 조사가 가능
- 3) 블로워/펌프의 2중 구조로 구성되어 있으므로 측정지점 노면 상태(토양, 콘크리트, 아스팔트)에 따라 효과적으로 구분하여 적용
- 4) 초소형 경량화로 운반이 용이하고, 분석조작이 간편하여 한 사람이 작업가능
- 5) 외기 혼입 방지 설계

■ 용도

- 1) 유류 또는 휘발성유기염소계 화합물(TCE, PCE 등)의 토양내의 상대적 농도 측정 및 분포 파악
- 2) 토양 간극수 채취가 가능하여 토양수 내의 중금속 오염 측정으로 적용 범위 확대 가능
- 3) 원지형의 파괴없이 조사 가능하여 가동 중인 공장이나 주유소의 오염 유무와 평면분포 파악 가능

4.2 Portable Drill

비파괴식 토양가스채집기는 평면 오염분포를 파악하는데 사용되지만, 오염물질은 복잡한 지질구조와 지하수 이동을 따라 복잡한 평면/입체 분포를 보여

심도별 오염분산(Plume)의 파악이 필수적이다. 이런 경우 시료채취 메쉬를 보다 세분하여 조사하는 것이 필요하므로 시료채취가 신속하고 좁은 장소에서도 가능하고, 교란되지 않는 토양시료 회수가 가능한 굴착장비가 요구된다.

이러한 조건을 만족하기 위해서 일본에서 개발 및 상용화되어 일본과 국내 특허 출원중인 Portable Drill 은 세밀화된 시료채취 메쉬에서의 조사에 매우 효과적인 회전·타격식 토양 및 토양가스 채집 장치이다.

■ 특징

- 1) 초소형 경량화로 운반 및 조작이 간편
- 2) 차량 탑재형이 아니어서 가동 중인 공장내로 진입이 가능하고 좁은 장소에서의 조사 가능
- 3) 기존의 타격식 굴착장비와 달리 회전·타격식 이어서 채취된 토양 시료의 교란이 없음
- 4) 원 위치의 토양가스 시료 만이 채취되어 조사의 정확도 향상
- 5) Geoprobe식 차량탑재형 굴착장비에 비해 경제성 및 작업의 신속성 탁월
- 6) 심도 10m까지 굴착 가능 (경제적 심도는 6m내외)

■ 용도

- 1) 토양 및 토양가스 시료 채집
- 2) 검지관 사용시 오염농도의 현장파악 가능

5. 결론

토양 오염 복원의 수요는 좁은 국토에서 사는 현실에 비추어 볼 때 점점 증가할 것이다. 전체 복원에 소요되는 경비를 줄이고 신뢰할 수 있는 복원 사업을 수행하기 위해서는 보다 세밀한 조사 간격에서 행한 정밀조사가 필수적이다. 일단 복원이 완결되어 주택이나 산업단지가 건설된 후에는 추후 오염이 재차 발견되어도 복원사업을 재시공하기가 매우 힘드므로 조사의 중요성은 성공적인 복원을 위해 강조될 수밖에 없다. 따라서 이런 관점에서 볼 때 세밀한 조사 간격에서 수행된 오염 조사 방법과 여기에 필요한 비파괴식 토양 가스 채집기와 간편하고 신뢰도가 높은 Portable Drill은 매우 효과적인 틀이 될 수 있다고 판단된다.

한국지반공학회 논문집 정기구독 신청 안내

회원 여러분의 안위를 기원합니다.

1999년 1월부터 우리학회의 간행물이 학회지와 논문집으로 분리 발간되었습니다. 학회지는 매월 무가로 회원들께 배포되며, 논문집은 유가로 1년에 20,000원의 구독료를 납부하고 받아 보실 수 있습니다. 필요하신 회원은 다음 사항을 참고하셔서 논문집 구독 신청을 하시기 바랍니다.

다 음

- 구 독 료 : 1년 6회, 20,000원
- 신청기한 : 수시(단, 신청시점이 구독료 납부 회계시점임)
- 입 금 처 : 국민은행 (예금주: 한국지반공학회) 534637-01-002333
- * 입금 후 반드시 학회 사무국(02-3474-4428, 7865)으로 연락하여 확인하시기 바랍니다.