

지중매설관의 균열에 의한 지반오염 사례연구

A Case Study of Subsurface Contamination by the Leakage of Underground Conduits

박 준범, Junboum Park, 박 규홍, Kyoohong Park

중앙대학교 건설대학 토목공학과 조교수,

Assistant Professors, Department of Civil Engineering, College of Construction Engineering, Chung-Ang University

개요(SYNOPSIS): Soil contamination produced by various human activities is one of the most serious problems occurring in industrial countries because it can directly contaminate local groundwater which is often the source of drinking water. Significant research effort is currently being conducted worldwide for remediation of contaminated subsurface. The required remediation approach varies from site to site, depending on the types of the hazardous waste and site conditions. About 40,000 liters of diesel were leaked when an underground conduit accidentally broke at a newly constructed landfill site in coastal area, Korea. The bore hole sampling was conducted to examine the hydrogeological characteristics of the contaminated site and to investigate the subsurface distribution, size of the plume, and the concentration of the contaminant. A variety of feasible remediation methods was also considered to clean up the contaminants spiked on soil particles, which could be captured and transported into the wastewater treatment processes.

1. 연구배경 및 목적

노후된 송유시설이나 지하저장탱크로부터 흘러나온 기름에 의한 지반의 오염은 그 빈도에 있어서 여타의 오염원보다 훨씬 심각한 상태에 있다.¹⁾ 지반에 유입된 기름(주로 organic contaminant)은 지하수층에 도달하게 되면 지하수의 흐름을 타고 광범위한 지역으로 이동되며(migrate), 궁극적으로는 우리의 식수원인 지하수의 오염(groundwater contamination)을 초래하게 되어 환경·생태학적으로 큰 문제가 된다. 최근에 언론에 표면화된 주유소 등의 지하저장탱크의 누유가능성²⁾, 도로 주행 시 발생하는 유조차의 사고로 인한 토양오염 등도 또 다른 지반오염의 원인이 되고 있다. 또한 지반오염은 궁극적으로는 해양오염의 원인이 되기도 하는데, 국내외 한 해양오염 사례로는 최근 마산만 해저에서 코아추출장비를 이용, 퇴적층에서 PCB와 다이옥신이 검출되었다는 보고³⁾가 있었다. 오염된 지반의 정화(remediation)에는 막대한 시간과 노력이 필요하게 되어 오염의 확산을 가능한 한 초기에 방지하고 제거하려는 노력이 지반공학자들 사이에 서서히 일고 있다. 이미 선진국에서는 지반오염처리에 대한 여러 기술(in-situ remediation technology)이 개발되었고, 각 오염지역의 수리지질학적(hydrogeological) 특성에 맞는 정화기술이 성공적으로 수행되고 있다. 우리나라에서도 환경문제 중의 하나인 지반오염에 대한 관심이 높아져 1995년 1월에 '토양환경보전법'이 제정되어 지반오염에 대한 법률적 근거가 마련되었다.

본 논문에서는 지중 송유관의 균열에서 발생하는 누유에 의한 지반오염의 실제 사례를 중심으로 잔류유류에 대한 분포상태 및 농도분석과 그에 대한 대처방안에 대해 논하고자 한다. 이에 따라 다음과 같은 연구가 이루어졌다.

- ① 유류누출지역의 수리지질학적(hydrogeological) 특성 조사
- ② Boring을 통해 지반 sample을 채취하여 오염의 규모와 농도 파악
- ③ 오염지역의 수리지질 및 오염물질의 특성에 적합한 정화기법(remediation techniques) 선택


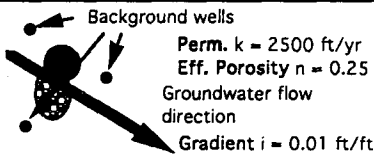
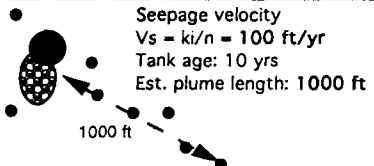
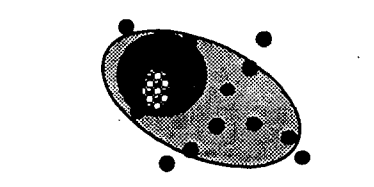
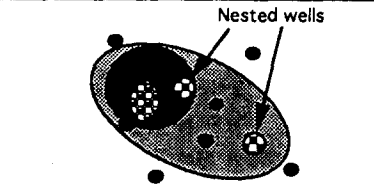
위의 방법에 입각하여 실제 지반오염에 대한 정화대책의 사례를 연구하고 지반오염에 대한 공학적 접근방법을 제시하고자 하였다. 먼저 오염된 지반의 특성과 범위, 오염된 지반을 복원하는 정화기술에 대해 살펴보고, 국내에서는 거의 보고된 바 없는 지반오염 및 지반정화노력의 한 사례에 대한 배경설명과 시료의 수집, 시료의 준비, 분석방법, 그리고 오염물질의 분포와 정화방법에 대해 기술하고자 한다.

2. 지반오염의 조사방안

지반오염물질의 성분, 농도 및 규모를 파악하고 나아가 오염지역의 수리지질학적 특성에 따른 오염물질의 지반내 이동방향과 속도 등을 예측하고 궁극적으로는 효과적인 정화대책을 세우기 위하여 오염지반에 대한 조사가 이루어져야 한다. 오염지반에 대한 조사는 크게 오염원 (source zone, 주로 지하수층에 도달하기 전까지의 불포화층)에 대한 조사와 지하수층(aquifer)에 형성된 오염대(plume)에 대한 조사로 나누어 지는데 먼저 오염원 지역의 특성조사(source zone characterization)는 다음과 같이 행한다.

- ① 기존의 자료와 오염원 주변의 기초토양시료(preliminary soil sample)로부터 오염물질의 종류를 파악하고 그 중에서 가장 이동성이 크거나 독성이 강하여 정화되어야 할 물질을 택하여 기준물질(indicator)로 삼는다.
- ② 오염원 주변에 boring을 실시하고 토양시료를 채취, 분석하여 기준시료의 수평 및 수직의 범위를 파악한다.
- ③ 만약 기준시료가 지하수면에 도달하지 않았으면 오염은 불포화토내에 국한되었다고 볼 수 있으나, 기준시료가 지하수면까지 도달되어 있으면 오염은 지하수대로 이어져 이동/확산되어 지하수층내에 오염대를 형성하였다고 볼 수 있으므로 둘째 단계의 조사, 즉 오염대조사(contaminant plume characterization)로 이어져야 한다. 오염대에 대한 조사방법은 Table 1에 나타나 있다⁵⁾. 오염대조사를 통하여 오염물질의 지반내 이동방향과 속도도 예측이 가능한 데 흙의 투수계수, 간극비, 지하수의 동수경사, 오염물질의 비중 및 용해도 등이 기본적으로 조사되어야 한다.

Table 1 Typical Program for Contaminant Plume Characterization

 <p>Underground storage tank Soil contamination: extends to depth of underlying saturated zone</p>	<p>Step 1: Source zone characterization *Locate potential sources *Define lateral/vertical extent of soil contamination *Characterize contaminant properties: solubility, density, etc. *Select indicator</p>
 <p>Background wells Perm. $k = 2500$ ft/yr Eff. Porosity $n = 0.25$ Groundwater flow direction Gradient $i = 0.01$ ft/ft</p>	<p>Step 2: Detection monitoring *Install at least 3 wells to define groundwater flow direction *Compare indicator concentrations in upgradient and downgradient wells *Run slug tests to define aquifer hydraulic properties: permeability, efficient porosity, hydraulic gradient, etc.</p>
 <p>Seepage velocity $V_s = ki/n = 100$ ft/yr Tank age: 10 yrs Est. plume length: 1000 ft</p>	<p>Step 3: Plume length *Locate wells to define plume length *Use i, n, and k to define V_s *Use V_s and estimated source age to estimate plume length *Space downgradient wells accordingly *Repeat as necessary to determine length</p>
	<p>Step 4: Plume width *Locate wells on transverse line to determine plume width *Can estimate width using advection/dispersion equation *Unusual plume shapes indicate possible presence of other contamination</p>
	<p>Step 5: Plume thickness *Install nested wells to determine depth of contamination *Estimate vertical gradient by comparing static water levels in deep and shallow nested wells</p>

3. 지반오염의 정화방안

지반오염의 정화과정은 크게 두가지 단계로 구분해 볼 수 있다. 먼저 오염물질을 추적하여 오염원을 찾아내고 이 오염원을 통제하는 오염원 통제(source control)가 첫번째 단계이다. 이는 오염을 발생시키는 원인을 제거하고 오염물질의 지반 내의 이동을 차단시키는 것인데 오염원 제거방법으로는 오염된 지역의 흙을 파내어(excavation) 파낸 흙을 정화한 후 현장에 다시 매립하는 방법과, 오염지역의 오염물질이 주변으로 더 이상 확산되는 것을 차단(isolation)하는 방법이 있다. 차단방법으로는 slurry wall, sheet pile, 또는 grouting 등이 차수벽(cutoff wall)재로 사용된다.

대부분의 경우 오염원통제는 2차 처리과정인 현장정화처리법(in-situ remediation)이 더욱 효과적으로 수행될 수 있는 여건을 조성하여 주는 장점이 있는 반면, 오염토양을 파내는 행위에 대한 추가비용의 부담 뿐 아니라, 토양을 고르는 장비 등의 비용, 파낸 토양을 현장에서 처리할 수 있는 충분한 공간이 제공되어야 한다는 것이 단점일 수 있다. 또 다른 단점은 오염지역의 흙을 대량 제거함으로써 지반용력의 평형상태를 깨게 되어 Rankine의 주동토압에 의한 파괴(Rankine active failure)를 일으킴으로써 인근구조물, 배설관 등의 안전에 위험을 초래할 수 있다. 따라서, 오염토양제거 시 간이흙막이벽 설치 등의 적절한 대책이 선행되어야 할 것이다. 또 오염지역의 차단방법인 차수벽의 설치는 시공이 난해하고, 추가비용이 많이 소요되므로 종종 오염원을 효과적으로 차단할 수 있는 장점에 불구하고 시행되지 않는 경향이 있다.

물체 단계에서는 오염원 통제가 이루어진 이후 오염지반을 현장에서 정화하는 현장정화처리법이 시행된다. 현재까지 연구되고 적용된 방법은 진공추출 및 처리법(pump and treat method), 흙 세척법(soil flushing or solution extraction), 생분해법(biodegradation), 혹은 증기추출법(vapor extraction) 등이 있다.

각 방법은 현장의 수리지질학적 상태와 오염물질의 특성에 따라 선택되어진다. 진공추출 및 처리법은 오염지역의 추출정(extraction well)을 설치하여 진공으로 오염된 지하수를 끌어올리는 방법인데 오염제거 초기에는 흙의 간극 사이에 있는 오염물질을 제거하게 되므로 매우 효과적으로 정화가 가능하나 흙에 흡착된 오염물질은 제거가 곤란하므로 종종 정화기준치에 못미치는 경우가 발생한다⁹⁾. 흙 세척법은 암측펌프 등으로 인위적인 동수경사(induced hydraulic gradient)를 발생시켜 오염지역에 물, 또는 물과 함께 화학약액, 산성/염기성 용액, 산화제 및 계면활성제를 주입시킴으로써 토양에 부착되어 있거나, 간극 사이에 잔류한 오염물질을 액체로 이동하게 한 후 그 오염물질을 함유한 액체를 수거하려는 것이 기본개념이다¹⁰⁾. 이 때 필요한 우물을 설치하여 펌프에 의해 오염지역을 통과한 물을 수처리공정에 의해 정화한 후 토양정화시스템의 시점으로 되돌려 보내는 순환체계를 갖도록 한다. 이러한 연속적인 순환은 현장의 오염지역이 정화되었다고 판단될 때까지 지속적으로 수행된다. 그러나 이 방법은 화학약액을 사용함에 따른 2차적 지반오염이 나타날 수 있으며 약액 주입 시 과도한 압력에 의한 지반의 수압파괴(hydraulic fracturing)이 일어나 오염물질이 효과적으로 제거되지 않을 수 있다. 생분해법은 흙 속에 있는 미생물에 산소와 양분(주로 N, P, K 따위)을 공급하여 그 수를 늘려서 미생물로 하여금 직접 오염물질을 분해시키는 방법인데, 2차처리가 필요없을 정도로 잔류오염물질이 남지 않고 신속하게 제거된다. 그러나 산소와 양분을 공급하는 주입정(injection well) 주변에 다량의 박테리아가 증식되어 주입정을 막아 사용할 수 없게 되는 biofouling 현상이 일어나기도 한다¹¹⁾. 공기 또는 증기를 흙 속에 불어넣어 휘발성이 강한 오염물질을 증발시켜 오염지역을 정화하는 증기추출법(vapor extraction)은 휘발성이 강한 오염물질 제거에 탁월한 효과가 있으나 후처리가 잘못 이루어지면 대기오염의 원인이 되며 지하수면 위의 지반에만 적용할 수 있는 단점이 있다.

4. 국내에서 발생한 지반오염의 일례

1995년 3월경 남해안에 있는 간척지에 새롭게 건설된 유류저장시설에서 유류의 지반누출사고가 발생했다. 해안으로부터 약 400 m 지점, 해발 약 20 m의 산중턱에 있는 지하저장탱크에서 해안으로 연결되는 유류수급관의 균열로 약 40,000 리터의 경유가 지반으로 누출되었다. 누유지역은 해안으로부터 약 150 m 거리에 있고, 누유지점은 지표에서 2.3 m 깊이에 있다. 누유현상은 누유지점으로부터 직선거리 200 m 지점의 해안에서 유증이 소량 발견됨으로써 밝혀지게 되었다. 누유지점으로부터 수평방향으로 2 m 떨어진 곳에 공동구가 위치하고 있다. 이 공동구는 약 4.5 m 깊이의 암반을 깎은 후 쇠석을 깔고 그 위에 슬래브(공동구의 저면)를 설치하여 인접건물의 상수도 및 전기시설의 배관용 공간으로 사용된다. 공동구의 저면은 지표면으로부터 약 2.5 m 깊이에 위치하며, 공동구의 폭은 1.8 m이다. 이 공동구는 누유지점으로부터 2 m 떨어진 곳에서 시작하여 약 110 m 직선으로 진행되다가 해안방향으로 직각으로 꺾여 70 m 가량 시설되어 있다. 이러한 공동구의 존재에 착안하여 공동구

가 시작되는 인접지반을 파내던 중 유류수급관의 파손부분을 찾아내었고, 그 주변 특히 공동구 입구 부분을 파내던 중 공동구 쇠석층에서 기름이 섞인 지하수가 흘러나오는 것을 발견하고 펌프를 사용하여 오염된 지하수 상당량을 퍼내었다. 이는 오염원 통제의 한과정으로써 결과적으로는 토양 또는 해안으로 유류가 더 이상 확산/이동하는 것을 저지하는 효과가 있었다. Fig. 1은 누유사고의 개요와 현장의 상황을 나타내고 있다.

오염지역은 최근 완성된 매립지이므로 현재 구체적으로 실측된 수리지질학적 자료는 미비하나, 매립지 공사 시공사와의 현장답사 및 조사로 대략적인 오염지역 주변의 topography를 파악할 수 있었다. 누유지역의 토양은 인위적인 혼합매립층으로 점토와 자갈 및 쉘트질로 구성되어 있다. 지하수위는 해수면 인접지역이므로 해수면과 거의 일치하는 것으로 생각되며, 만조 시의 지하수위는 지표면으로부터 약 2 m 깊이이고, 간조 시는 약 4 m 깊이에 위치하고 있다. 누유지역이 매립되기 전의 지표의 경사는 누유지점으로부터 해안과 건물 A를 향하여 약 10 % 경사로 내려간다.

해안에서 유증을 발견한 직후 oil fence가 가설되었고, 유분제거제(oil remover)가 수차례 살포되어 해수의 유분을 제거하였다. 관찰자의 설명에 의하면 해안으로 유출된 기름은 기름방울이 간헐적으로 떠오르는 형식이었다고 하므로 그 양은 그리 많지 않았던 것으로 추정된다. 1995년 5월 초 관찰한 바에 의하면, 이미 oil fence 안의 해수에 유증을 발견할 수 없었고, 냄새도 느낄 수 없었다. 그 이후에도 계속 oil fence를 가설해 놓은 상태에서 지속적인 관찰을 하였으나, 추가적인 기름유출은 발견되지 않았다. 참고로 이 해역은 2등급해역으로서 유분이 검출되어서는 안되는 곳이다¹⁰⁾. 유출된 기름은 0.2% 유황성분(중량비)을 포함하는 저유황 경유(diesel fuel)로 주로 선박용 연료로 사용되며 비중은 0.8403 kg/l로 LNAPL(light nonaqueous phase liquid)로 구분된다. 물보다 가벼워서 지하수면 위에 뜨게 된다. 비중은 3.668 CST이다. 누유된 기름량의 산출은 베르누이의 방정식과 흙의 응력사이에서 계산되어 약 40,000 리터로 추정되었으며 이는 유류 탱크에서 사라진 양과도 거의 일치하는 것으로 나타났다. 또한 해수오염을 방지하고자 사용되었던 유분제거제는 한국화학의 PC-1313으로 미생물에 의한 분해제이다. 무독성(nontoxic)이며 비가연성(nonflammable)이다.

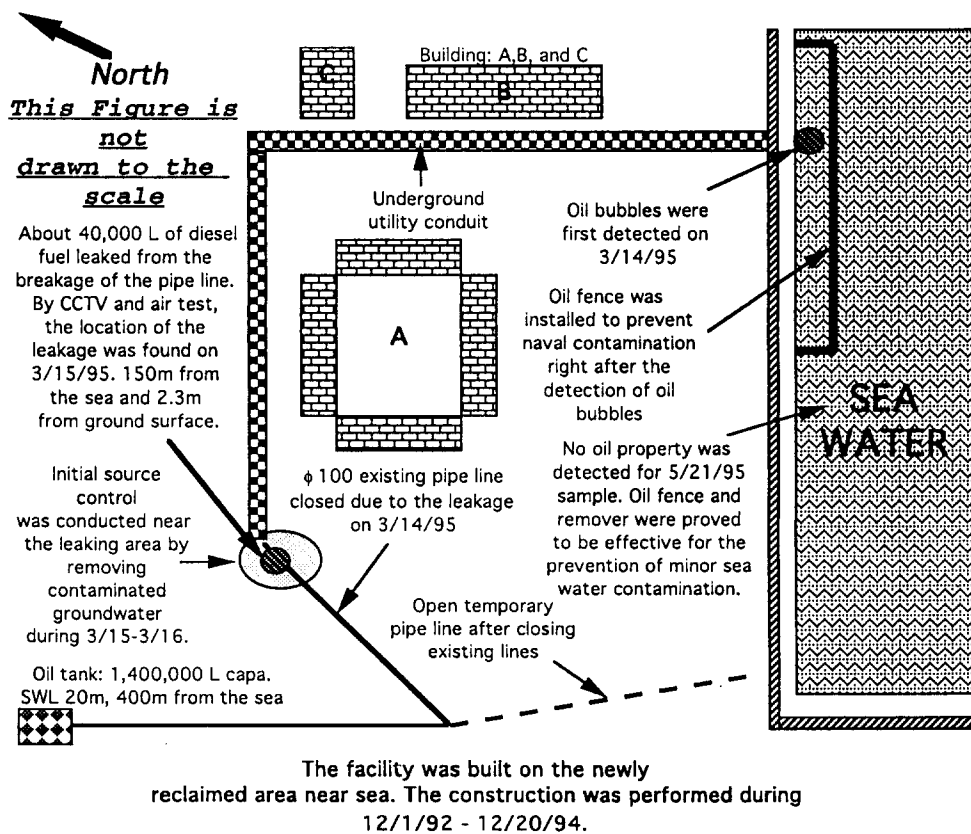


Fig. 1 Map summarizing the history of events at the site

누유지역을 중심으로 오염가능지역의 boring 위치를 선정하였다. Boring을 통해 오염토를 1995년 5월 초순에 시작하여 약 20일간 채취하였다. 총 19공의 boring이 실시되었고, 지하수위, 암반의 깊이, 토질특성 등의 수리지질학적 정보와 오염규모를 파악하는데 필요한 오염물질의 농도에 관련된 정보를 들 수집할 수 있었다. 시료는 drilling auger로 채취하였으므로 교란시료를 얻게 되었다. 압밀, 강도실험이 행하여지지 않았으므로 불교란시료는 필요치 않았으나 불교란시료에 대한 투수실험은 행할 수 없었다. 채취된 sample은 깊이 표시 후 냉장 및 밀폐하여 보관한 후 실험실로 운반하였다. Boring의 실시에 따른 지반의 깊이별 특성, 지하수위, 암반의 위치 및 채취된 시료의 깊이 등에 관한 정보는 drilling log에 기록하였다. 오염농도의 분포를 파악하고자 각 boring 위치에서 약 1 m 깊이 간격으로 암반층까지 3~4개의 sample을 채취하였다. 해수시료는 1995년 5월 초에 oil fence 안과 밖에서 각각 1.5 리터씩 채취하였고 1995년 5월 말경에 다시 해수시료를 채취하여 그 차이를 확인해보고자 하였다. boring의 위치 및 해수시료의 채취위치는 Fig. 2에 나타나 있다.

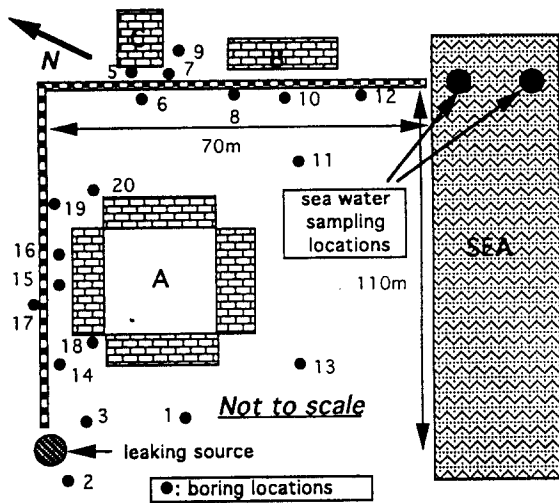


Fig.2 Boring and sea water sampling locations

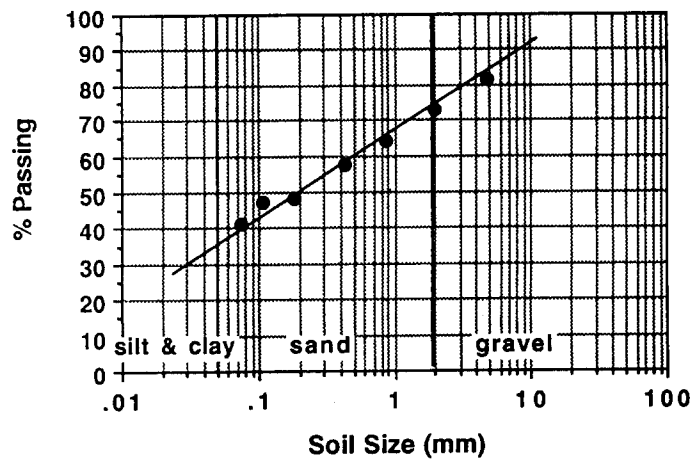


Fig. 3 Soil Size Distribution Curve

4. 결과

채취된 boring 시료에 대해 입도분석실험(soil-size distribution)을 행하였다. 입도분포곡선(Fig. 3)에 따르면 조립토가 65%, 세립토가 35%로 비교적 양입도의 분포를 나타내었다. 흙은 통일분류법(Unified Classification System)으로 'silty sand with gravel(SM)'로 분류되었다. 간극비 e 는 0.5, 간극율 n 은 0.33, 흙의 단위중량은 1800 kg/m^3 인 것으로 산정되었다. 투수계수는 실제 불교란시료에 대하여 행하지 못하였으므로 Hazen 공식을 이용하여 계산하였다. 계산결과 투수계수 K 는 대략 $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ cm/sec}$ 로 나타났다. 흙과 해수의 오염농도 분석은 N-Hexane extraction 후 partition-gravimetric method¹³⁾를 이용하여 각 boring위치의 오염농도를 파악하였다.

두 차례에 걸쳐 oil fence 안팎에서 채취한 해수시료의 유분함유량을 조사한 결과, 제 1차 시료채취 시 현장에서 육안으로나 후각으로는 특별한 유증을 관찰하거나 느낄 수 없었으나, 노말핵산추출법에 의해 분석한 결과 25-35 mg/l의 유분이 검출되었음을 알 수 있다. 이는 기름유출 후 인접해안지역이 어느정도 오염되어 있었음을 나타내는 것이다. 그러나, 제 2차로 채취한 시료는 유분이 검출되지 않았다. 즉 oil remover 살포 이후 해수의 유분이 효과적으로 제거되었음을 확인할 수 있었다. 또한 2차 시료를 채취하기 하루 전부터 약 50 mm의 강우량이 기록된 것을 주목해 볼 때, 오염된 토양으로부터의 잔류유분이 해안으로 유출되지 않았음을 알 수 있다.

Boring한 시료에 대하여 지하수의 깊이를 조사하고 유분농도분석을 실시하여 Fig. 4의 결과를 얻었다. 이러한 형태의 깊이별 유분농도는 정화처리 시, injection well과 extraction well의 깊이와 위치를 결정하는 데 중요한 자료를 제공할 것이다. 이 그림을 통해 알 수 있는 것처럼 공동구 부분 중 누유지점의 인접지대는 유출유류 발견 직후 시행한 pumping과 유류수거작업을 통해 상당량의 기름이 제거된 것으로 보인다. 그러나 지하공동구로 둘러싸인 대부분의 지역(중심 60 m x 100 m)은 평균유분농도 88 mg/kg으로 오염대가 형성되었으며 boring # 12지역에서는 최고 131 mg/kg으로 가장 높은 농도를 보였다. 그러나 # 15에서는 25 mg/kg이 나타나 공동구 저면을 따라 행하여진 초기 정화/제거작업이 효과적으로 이루어졌음을 알 수 있었다. 오염물질은 지하수의 흐름방향을 따라 이동되었음이 명백한데 이는 가장 먼저 기름방울이 발견된 해면과 거의 일치하게 된다. 지하수위는 -3.2 m~-4.0 m로 동수경사 약 0.01로 나타난다. 평균오염농도 38 mg/kg지역은 보다 넓게(80 m x 130 m) 존재하며 # 5에서 96 mg/kg이 나타났고 # 1, 2와 3에서는 유분이 전혀 검출되지 않았다. 단, 보다 많은 수의 boring으로 농도 0인 점을 명확히 찾아내어 정확한 오염대의 규모를 파악하였으면 하는 아쉬움이 남으나 연구의 시간과 경제적인 면을 고려할 때 추가적인 boring은 실시되지 않았다.

오염대의 두께는 기름이 LNAPL이므로 주로 지하수면을 따라 존재하는데 조수간만에 따른 지하수위의 변화로 오염대의 두께가 예상보다 크게 나타났다. 약 지표로부터 2 m~6 m 사이에 존재하였는데 단 암반층 밑으로는 오염물질이 확산되지 않았다고 가정한다. 만약 암반층에 joint나 crack이 현저히 발달되어 있으면 이를 타고 오염물질이 더욱 깊은 곳으로 전이될 수도 있다. 이런 경우에는 정화작업이 더욱 난해하여지게 된다. 동수경사, 투수계수, 유효간극률로 계산된 오염물질의 지반내 이동속도와 오염누출지역에서 유증이 발견된 해안까지의 거리로 기름의 해안도달시간을 산출하면 실제 도달시간보다 엄청나게 길게 나오게 된다. 이는 이 지역이 최근의 매립지였음을 나타내는 하나의 증거가 된다. 즉 지반 곳곳이 균질(homogeneous)하게 이루어진 것이 아니라 자갈, 쇠석층이 많이 존재하며 다짐이 효과적으로 이루어지지 않은 층이 있어서 기름이 지반내의 흐름이 용이한 통로(preferential flow path)로 흘렀음을 보여준다. 이런 경우 오염물질의 지반내의 이동은 수심, 수백배 빨라지게 된다.

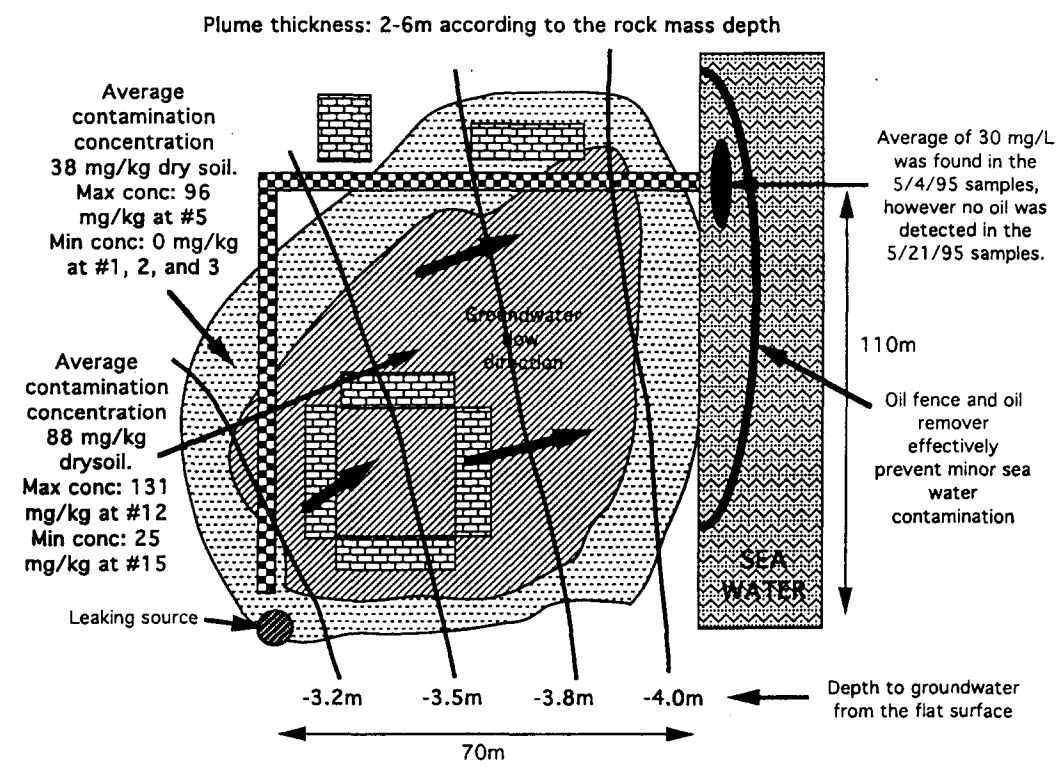


Fig. 4 Groundwater surface and plume location/concentration

5. 결론

Boring 시험을 한 결과, 기름(diesel fuel, LNAPL) 누유지점에서 시작하여 지하수의 흐름을 따라 해안까지 확산되었다. 하지만, 누유지점 발견 직후, 유출 유류 제거작업을 실시하여 상당량의 유분을 제거한 것은 매우 효과적인 대처이었다. 현재 검출된 토양 내 유분은 오염원지역에 대한 초기의 오염제거 지역이 잘 이루어져 더 이상의 추가오염은 발생하지 않았으므로 토양의 흡착능(adsorption capacity)을 고려할 때, 현 위치에서 대부분 잔존할 것으로 예측된다. 오염의 규모와 농도는 Fig. 4에 잘 나타나 있다. 단 추가 boring으로 보다 명확한 오염대(plume)의 크기와 농도를 밝힘이 바람직하다 하겠다. 토양 내 잔류유분은 오염물질 자체의 휘발성과 토양 내 미생물에 의한 생분해(biodegradation)에 의해 어느 정도 자정될 것으로 생각된다. 그러나 우려되고 있는 고농도(30 mg/kg 이상)의 지반환경오염에 대한 대처방안은 아래와 같이 요약할 수 있다.

1. 고농도 오염지역의 토양은 가능한 한 오염되지 않은 흙으로 치환한다.
2. 해안으로 유출되는 유분을 상시 감시하고, 특히 우기에는 해수의 수질분석을 행함으로써 토양 내 유분이 해수로 전이되는지를 확인한다. oil fence는 장기간 설치하여 둔다.
3. 공동구로 둘러싸인 중심지역(60 m x 100 m)은 진공추출 및 처리법을 적용하고 잔류유류에 대하여는 증기추출법이나, 생분해법으로 추가처리한다. 이 지역의 수리지질학적 특징을 살려 화학약추출법(solvent extraction)도 적용해 볼지하다.

참고문헌

1. Fetter, C. W., (1993). Contaminant hydrogeology, MacMillan, New York, NY, pp. 29-31.
2. Valentinetti, R. A., (1989). Federal underground storage tank regulations and contaminated soils, petroleum contaminated soils Vol. I, remediation techniques, environmental fate, risk assessment, Kostecki, P. T. and Calabrese, E. J. ed., Lewis publishers, pp. 55-60.
3. Daugherty, S. J., (1991). Regulatory approaches to hydrocarbon contamination from underground storage tanks, hydrocarbon contaminated soils and groundwater, analysis, fate, environmental and public health effects, and remediation, Vol. 1, Kostecki, P. T. and Calabrese, E. J. ed., Lewis publishers, pp. 23-63.
4. 조선일보, (1995). 남해안 생태계 파괴정후, 1995년 7월 31일, p.28.
5. Bedient, P. B., Rifai, H. S., and Newell, C. J., (1994). Groundwater contamination, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., pp. 389-418.
6. Whiffin, R. B. and Bahr, J. M. (1984). Assessment of purge well effectiveness for aquifer decontamination, Proceedings of 4th national symposium and exposition on aquifer restoration and groundwater monitoring, pp. 75-81.
7. O'Neill, M. W., Symons, J. M., Lazaridou, M. E., and Park, J. B., (1993). In situ treatment of soil for the extraction of organic contaminants, Environmental progress, Vol. 12, pp. 12-23.
8. Park, J. B., (1994). Laboratory model of remediation of contaminated soils by aqueous solution extraction, Ph.D. dissertation, University of Houston, Houston, U.S.A., pp. 72-76.
9. Thomas, J. M. and Ward, C. H., (1989). In situ bioremediation of organic contaminants in the subsurface, Environmental science and

technology, Vol. 23, pp. 169-174.

10. 해역별 수질기준 유지를 위한 등급별 해역, 개정 1990. 5. 24. 환경청 고시 제 90-11호.

11. American public health association, (1990). Standard methods for the examination of water and wastewater, 17th ed., Washington DC, pp. 5/24-5/29.