GPR 탐사방법을 이용한 유류오염물질(LNAPL) 탐지

김창렬 (농업기반공사)

LNAPL Detection with GPR

Changryol Kim (Korea Agricultural & Rural Infrastructure Corporation)

요 약: 유기 석유화학 오염 물질인 휘발유가 지하 분포 시, 지하수면 위 토양 매질(vadose zone)내에 존재할 수 있는 기체 상태(vapor phase)와, 지하수면의 상승 또는 하강에 의해 분포할 수 있는 residual phase의 유류 오염 물질이 GPR에 미치는 반응을 조사하기 위하여 모래와 자갈을 토양 매질로서 채운 탱크를 이용한 모델 실험이 수행되었다. 물만 사용하여 지하수면의 상승과 하강을 유도한 후, 석유 수송을 위하여 지하에 매장된 파이프 혹은 석유저장을 위한 지하 탱크로부터 지하수면으로의 유류 오염을 simulation하기 위하여 모델 탱크 바닥을 통하여 휘발유가 주입되었다. 본 연구 결과, 수분 함량에 따른 GPR의 민감성과 지하수면의 변화 관측에의 GPR 효율성이 입증되었다. 또한, 휘발성 유류 오염 물질의 기체상태가 vadose zone에 분포 시 GPR를 이용하여 탐지할 수 있는 가능성과, 지하수면의 상승에 의해 지하수면 밑의 물로 포화된 토양(water saturated zone)에 분포할 수 있는 residual phase의 유류 오염 물질의 탐지 가능성이 모델 실험을 통하여 확립되었다. 그리고, residual phase의 유류 오염 물질이 지하수면 아래에 분포하는 오염지역에서 GPR을 이용한 유류 오염물질을 탐지할 수 있는 새로운 탐사전략이 제시되었다.

주요어: vadose zone, vapor phase, residual phase, GPR, water saturated zone

Abstract: An experiment was conducted using a sand and gravel-filled tank model, to investigate the influence on the GPR response of vadose zone gasoline vapor phase effects and residual gasoline distributed by a fluctuating water table. After background GPR measurements were made with only water in the tank, gasoline was injected into the bottom of the model tank to simulate a subsurface discharge from a leaking pipe or tank. Results from the experiment show the sensitivity of GPR to the changes in the moisture content and its effectiveness for monitoring minor fluctuation of the water table. The results also demonstrate a potential of GPR for detecting possible vapor phase effects of volatile hydrocarbons in the vadose zone as a function of time, and for detecting the effects of residual phase of hydrocarbons in the water saturated system. In addition, the results provide the basis for a strategy that has the potential to successfully detect and delineate LNAPL contamination at field sites where zones of residual LNAPL in the water saturated system are present in the subsurface.

Keywords: GPR, vapor phase effects, residual phase, LNAPL

1. 서 론

GPR (Ground Penetrating Radar) 탐사방법은 고주파수(50MHz-1GHz)의 전자기파를 이용, 천부 지질의 고해상도 image 제공에 광범위하게 쓰이는 지구물리탐사 방법으로서 환경오염지역의 천부 토질 또는 지질조사를 위한 수리지질학적 응용 분야에 널리 사용되고 있다 (Benson, 1995; Beres and Haeni, 1991; Davis and Annan, 1989, Peters et al.,1994; Van Overmeeren, 1994). 또한 GPR 탐사방법은 지하수면 탐지와 더불어 천부 지하에 분포하는 유기 석유화학 오염 물질의 탐지에 유용한 지구물리 탐사방법으로 이용되고 있다.

최근 십 수년 동안 GPR을 이용한 LNAPL (Light Non-aqueous Phase Liquid) 탐지에 관한 다양한 연구가 여러 학자들에 의하여 수행되어 왔다. 이들의 연구는 주로 (1) theoretical modeling (Barer and Morey, 1994; Douglas et al., 1992), (2) controlled laboratory and model tank experiment (Daniels et al., 1995; DeRyck et al., 1993), (3) controlled field experiment (Campbell et al., 1996; Daniels et al., 1992), (4) uncontrolled field investigation (Daniels et al., 1995; Grumman and Daniels, 1995; Maxwell and Schmock, 1995; Olhoeft, 1986) 등의 방법을 통하여 이루어지고 있다. 이들의 다양한 연구 방법은 보편적인 LNAPL 탐지 전략에 관한 중요한 정보를 제공한다. GPR을 이용한 LNAPL의 탐지전략은 free phase LNAPL 부근의 capillary fringe와 vadose zone에서의 이상 반응(anomalous response)을 조사하는 데 중점을 두고 있다. 이상 반응 탐지를 위한 방법으로서 LNAPL 오염지역에서의 radar 반사파의 도착시간(reflection arrival time)의 변화, 반사파의 세기 (reflection strength) 변화, 그리고 반사파 신호의 감쇠 (signal attenuation) 등의 조사가 이용되고 있다.

본 연구의 중점은 휘발유, 등유, 혹은 경유와 같이 물보다 가벼운 유기 석유화학 오염물질(LNAPL)의 지하 분포 시, 지하수면 위 토양 매질 내에 존재할 수 있는 기체 상태(vapor phase)와 지하수면의 상승에 의해 지하수 포화 매질(water-saturated zone)내에 residual phase로 존재할 수 있는 오염 지역을 GPR 탐사 방법을 이용하여 탐지할 수 있는 가능성에 관한 조사를 모델 탱크 실험을 통하여 확립하는 데 있다. 본 연구 실험에서 수리지질학적 오염환경은 석유 수송 또는 저장을 위하여 지하에 매장된 파이프 혹은 탱크로부터 지하수면으로의 유류 물질의 오염 후, 지하수면이 상승하거나, 유류물질이 지하수면을 따라 이동한 후, 뒤따른 지하수면의 상승으로 인해 지하수면 하의 포화 매질이 유류 물질의 residual phase로 오염된 지역을 simulation하였다. 현재까지 발표된 연구는 여러 특정 오염 환경 하에서 LNAPL 탐지 가능성에 관한 mechanism은 제시하였지만, 지하수로 포화된 매질 내에 존재할 수 있는 residual phase의 유류 오염 물질 탐지를 위한 탐사 전략에 관한 연구는 전무한 현실이다.

2. 실험 방법

상기 언급한 연구를 위하여 유류 오염물질의 지하분포를 수리지질학적으로 simulation하기 위한 모델 실험이 수행되었다. 모델 실험에는 모래와 자갈을 채운 원통형(지름 242 cm, 높이 121 cm)의 폴리에틸렌 탱크, 그리고 물과 휘발유가 사용되었다 (Fig. 1. (a) 참조). 탱크

바닥 중앙에 물과 휘발유의 주입 또는 배출을 위한 통로와 탱크 벽 주위에 수위 등의 측정을 위한 관정이 설치되었다. 크기 0.64 – 0.95 cm의 자갈이 16.5 cm의 두께로 탱크 바닥에, 그 위로 90 cm의 coarse quartz sand (0.5 – 1 mm)가 탱크를 채우고 있다. 자갈과 모래의 공극율을 각각 36%와 31%, 그리고 모래에서 capillary rise는 물에 대하여 11.4 cm가 휘발유에 대하여는 6.4cm가 측정되었다. 바닥에 놓인 자갈은 그 위의 모래보다 투과성(permeability)이 뛰어나므로, 이는 바닥의 통로를 통한 물과 휘발유의 주입 또는 배출, 그리고 수면의 수평적인 상승과 하강을 용이하게 할 것으로 간주되었다.

GPR 측정은 매질 모래 위에 설치된 플라스틱 커버 위 7.62 cm 간격의 17 측선(길이 121 cm)을 따라 GPR grid 상에서 이루어졌으며 (Fig. 1. (b) 참조), 측정 장비로는 GSSI SIR-10A와 중심 주파수 (center frequency) 500 MHz의 GSSI model 3101 bistatic antenna가 사용되었다. 본 연구를 위한 모델 실험은 연속적인 두 모델 실험으로 구성되어있다.

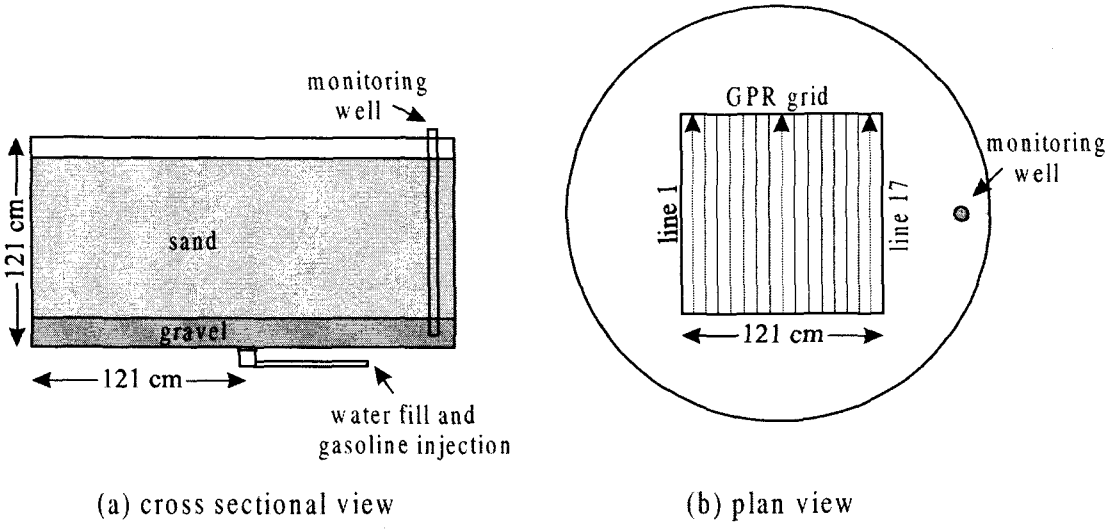

Fig. 1. Configuration of model tank and GPR survey grid: (a) cross sectional and (b) plan view (sand layer is 90 cm thick and gravel layer is 16.5 cm thick).

실험 1: Fluctuating Water Table Model

첫 번째 모델 실험은 지하수면의 변화를 관측하기 위한 GPR의 능력여부 조사와 지하수면 위의 토양(vadose zone)에서 수분 함량 변화에 따른 GPR의 민감성 조사에 목적을 두고 있으며, 이를 위하여 모델 탱크 바닥을 통하여 물을 주입, 배수함으로써 지하수면의 상승과 하강이 유도되었다. 모델 탱크로의 물 주입 전, 초기 GPR 측정이 수행되었고 이어서 세 단계(25.4, 35.6, 그리고 66 cm)에 걸쳐 수면의 상승이 유도되었으며, 각 단계에서 측정이 이루어졌다. 수면 높이 66 cm에서의 GPR 측정 후, 탱크로부터 배수가 유도되어 세 단계(30.5, 13.8, 그리고 0 cm)에 걸쳐 수면의 하강이 이루어졌으며, 또한 각 단계에서 측정이 수행되었다. 배수 후, 탱크 내에는 residual saturation의 물이 매질(모래, 자갈)내에 남겨졌다. 수면의 상승과 하강 도중, 각 단계의 수면의 위치에서 탱크내의 system이 평형 상태에 도달하는 동

안 발생할 수 있는 변화를 조사하기 위하여 5 - 6 번의 GPR 측정이 30분 간격으로 반복되었다.

실험 2: Fluctuating Water Table Model with Gasoline

두 번째 모델 실험에서는 석유 수송 또는 저장을 위하여 지하에 매장된 파이프 혹은 탱크로부터 지하수면으로의 LNAPL 오염을 simulation하기 위하여 모델 탱크의 바닥을 통하여 휘발유를 주입한 후, 물을 사용하여 지하수면의 상승과 하강을 유도하였고, 이를 통해 발생된 여러 다른 상태(vapor phase in the vadose zone, residual saturation phase in the water saturated zone)의 LNAPL 지하 오염에 대한 GPR의 반응이 조사되었다.

모델 탱크로의 휘발유 주입 이전, GPR 측정 시 7.6 cm 정도의 물이 탱크 바닥에 남아 있는 것이 관측되었다. 이 물은 탱크 내의 모래와 자갈에 남아 있던 residual saturation을 초과하는 잔여분으로 실험 1의 배수 이후 (약 16 시간 경과) 탱크의 바닥으로 이동하여 축적된 것으로 사료된다. GPR 측정 후, 지하수면 밑에서의 LNAPL spill를 simulation하기 위하여 219 liter의 휘발유가 모델 탱크에 주입되어 물로 포화된 자갈층을 경유하여 지하수면 위로 유도되었다. 휘발유 주입 후, (물과 휘발유의) liquid level은 17.8cm로 관측되었으며, 여러 차례에 걸친 GPR 측정이 반복되었다. 측정 후, 휘발유 밑으로 물을 주입하여 2 단계(53.3 그리고 73.7cm)에 걸쳐 지하수면의 상승이 유도되었으며, 각 단계에서 GPR 측정이 이루어졌다. GPR 측정 후, 탱크로부터 물과 휘발유의 배출이 유도되어 세 단계(34.3, 7.6, 그리고 0 cm)에 걸쳐 liquid level의 하강이 이루어졌으며, 또한 각 단계에서 GPR 측정이 수행되었다. 물과 휘발유의 배출 후, 탱크 내에는 residual saturation의 물과 휘발유가 매질(모래, 자갈)에 남겨졌다. 여러 단계에 거친 liquid level의 상승과 하강 도중, 각 단계에서 시간 변화에 따른 오염물질의 GPR에 대한 반응을 조사하기 위하여 실험 1의 측정과 같은 방법으로 data 획득이 반복되었다.

3. 결과 및 고찰

실험 1: Fluctuating Water Table Model

Fig. 2는 지하수면의 상승과 하강 도중, 각 단계의 지하수면에서의 2-D GPR profile section을 나타낸다. 2-D section 상에서 water saturated zone에서의 반사파는 지하수면(water table)이 아니고 그 위의 capillary fringe에서 반사된 것이다. Capillary fringe에서의 수분 함량은 100%에 가깝기 때문에 지하수면 상하에서의 유전율(dielectric permittivity)의 차이는 미소하여 GPR이 지하수면에서 반사파를 탐지하는 것은 상당히 어려울 것으로 사료된다. 그러므로, capillary fringe를 가지고 있는 지하 토양 매질에서는 capillary fringe의 상부가 지구물리학적인 지하수면(geophysical water table)으로 GPR 탐사에서 탐지되고 있다. Fig. 2에서 각각의 지하수면에서의 2-D section은 지하수면의 상승과 하강 도중, 지하수면의 수직 변화에 대한 GPR의 민감성을 나타낸다. 모래와 자갈층 사이의 경계면에서 GPR의 반응은 이 면이 지하수면 위에 존재할 시 radar 입사파와 같은 극성(polarity)을 보이며 (Fig. 2 (a), (f), 그리고 (g)), 이 면이 지하수면 아래에 위치 시 입사파와는 다른 극성(reversed polarity)의 매우 약한 signal을 보

이고 있다 (Fig. 2 (b), (c), (d), 그리고 (e)). Fig. 2(e)에서 geophysical water table까지의 왕복거리(two-way travel distance)는 Fig. 2 (b)의 같은 반사면까지의 왕복거리보다 작음에도 불구하고 왕복시간(two-way travel time)은 Fig. 2 (b)의 같은 반사면까지의 왕복시간보다 다소 크게 탐지되었다. 이는 Fig. 2 (e)에서 capillary fringe위의 vadose zone 내에 residual saturation의 물을 함유하고 있는 부분에서 radar 파의 속도가 둔화되어 나타나는 이상 효과(anomalous effect)로 해석된다.

실험 2: Fluctuating Water Table Model with Gasoline

Fig. 3은 모델 탱크로의 휘발유 주입 이전과 이후, 그리고 이어진 지하수면의 상승과 하강 도중, 각 단계의 liquid level에서 첫 번째 획득된 자료의 2- D GPR profile section을 나타낸다. 휘발유 주입 이후 (Fig. 2 (b)), 지하수면의 상승 시 일부의 휘발유는 지하수면 밑의 물로 포화된 매질(모래)의 공극 내에 고립된 물방울(isolated blob)의 형태인 residual saturation의 상태로 존재하고, 나머지 free phase의 휘발유는 지하수면과 함께 상승한다 (Fetter, 1993; Wilson and Conrad, 1984). Mercer and Cohen (1990)에 의하면 물로 포화된 매질에서 유기 석유 화학물질의 residual saturation은 매질의 종류에 따라 15-50%의 범위를 갖는 것으로 알려져 있다. 실험 1의 경우와는 달리 free phase의 휘발유 밑에 위치하는 지하수면이 실험 2의 GPR 자료에서는 지구물리학적인 지하수면(geophysical water table)으로 탐지되었다. 모래와 자갈층 사이의 경계면에서 radar 반사파는 실험 1에서와 비슷한 경향의 반응을 나타낸다. 지하수면 위에 위치하는 free phase의 휘발유를 포함하는 매질(혹은 휘발유로 포화된 매질)에서의 radar 파의 반사는 휘발유로 포화된 매질과 그 위의 공기를 포함하는 매질 (혹은 residual saturation의 물 혹은/그리고 휘발유를 포함하는 매질) 사이의 유전 상수의 차이가 미소(휘발유의 유전상수=2-3, 공기의 유전상수=1)하여 GPR 자료에 탐지되지 않았다.

휘발유 주입 이전과 이후의 GPR 자료 비교

물로 포화된 매질 내에 residual saturation으로 분포하는 휘발유의 효과: 모래와 자갈층 사이의 경계면에서의 radar 반사파는 이 경계면이 residual saturation의 휘발유를 포함하며 물로 포화된 모래층의 밑에 위치하고 있을 시(Fig. 3 (c), (d), 그리고 (e))가 이 경계면이 물로만 포화된 모래층의 밑에 위치하고 있을 시(Fig. 2 (b), (c), (d), 그리고 (e))에 비하여 훨씬 강한 signal를 나타낸다. Residual saturation의 휘발유를 포함하며 물로 포화된 모래층(Fig. 3 (c), (d), 그리고 (e))은 residual saturation으로 분포하는 휘발유(유전상수=2-3)로 인하여 물(유전상수=80)로만 포화된 모래층(Fig. 2 (b), (c), (d), 그리고 (e))보다 낮은 유전상수 값을 갖는다. 그러므로, residual saturation의 휘발유를 포함하며 물로 포화된 모래층은 물로만 포화된 모래층보다 더 많은 radar 파의 에너지를 통과시킴으로써, 모래와 자갈층 사이의 경계면에서의 더 강한 radar 파의 반사를 야기하는 것으로 사료된다. 이 효과는 residual LNAPL이 물로 포화된 매질 내에 존재하는 환경 오염 지역의 탐지에 GPR이 유용하게 사용될 수 있음을 보여 주고 있다.

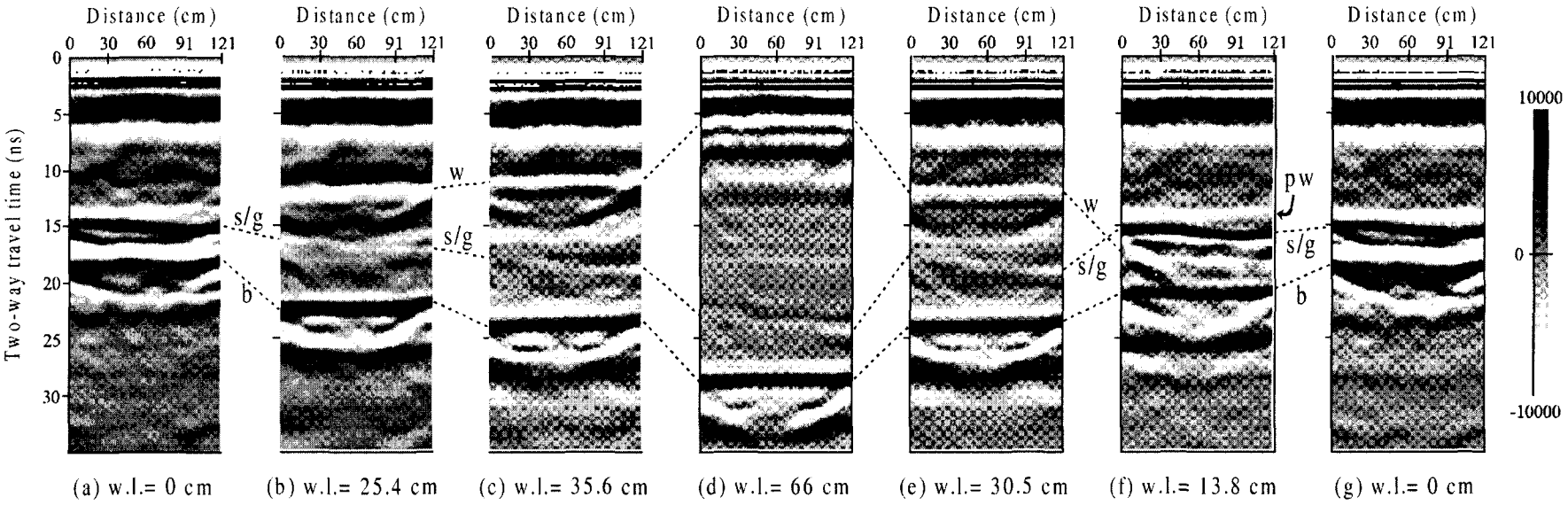

Fig. 2 2-D GPR profile sections at each level of water table from the fluctuating water table model. s/g: sand-gravel interface, b: tank bottom, w: geophysical water table, pw: perched water table, w.l.: water level.

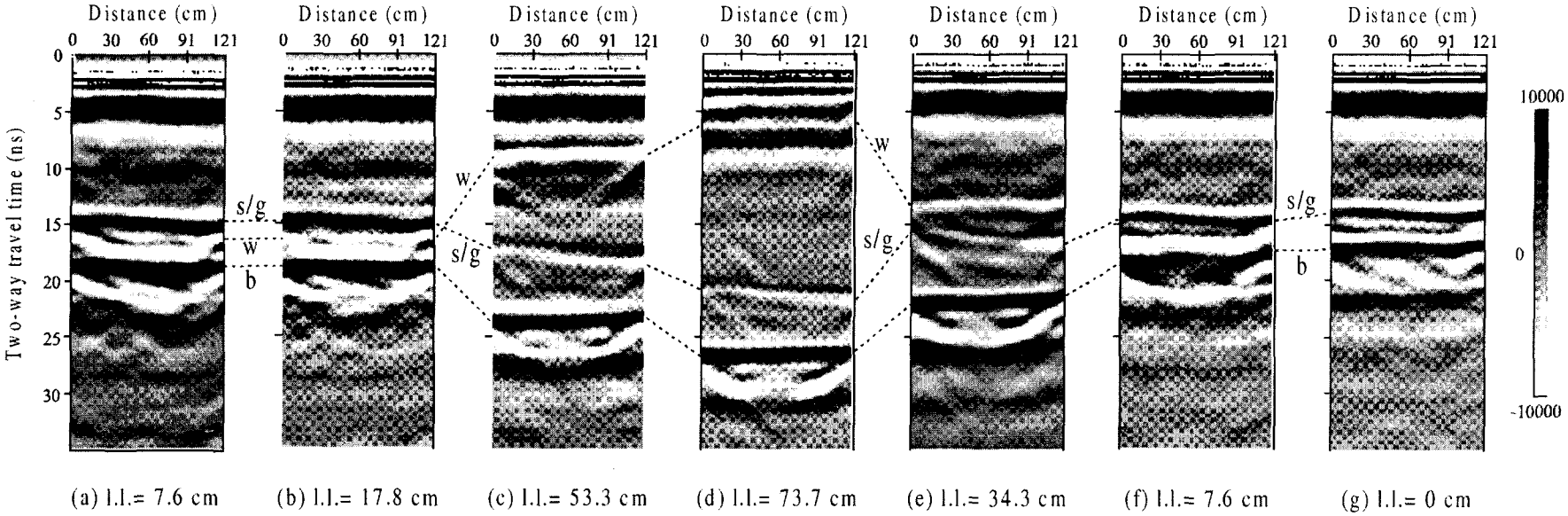

Fig. 3 2-D GPR profile sections at each stage of liquid level from the fluctuating water table model with gasoline. s/g: sand-gravel interface, w: geophysical water table, b: tank bottom, l.l.: liquid level.

Vadose zone에 분포하는 가스상태 (vapor phase) 휘발유의 효과: Fig. 4는 모델 탱크로의 휘발유 주입 이전과 이후에 free phase의 휘발유 위의 vadose zone에서 시간에 따른 GPR 반응의 변화를 나타내고 있다. 휘발유 주입 이후, 반사파 왕복 시간 8-13 ns 부분에서 radar signal의 세기가 시간에 따라 감소하고 있는 것이 Fig. 4의 2-D section에 탐지되었다. 이 현상은 Fig. 5의 3-D time slice 자료(9-11ns)에서도 현저히 나타나고 있다. LNAPL 오염지역의 vadose zone에서의 GPR signal의 감소는 여러 학자들에 의해 보고된 바 있다 (Douglas et al., 1992; Daniels et al., 1995; Grumman and Daniels, 1995; Maxwell and Schmock, 1995). 이 실험에서는 휘발유가 모델 탱크의 바닥으로부터 주입되었고, GPR 측정 시 vadose zone에는 어떤 상태(phase)의 휘발유도 존재하지 않았으며, 단지 residual saturation의 물만이 존재하고 있었다. 그러므로, 탱크 내 vadose zone에서 관찰된 GPR signal의 감쇠 현상은 free phase의 휘발유로부터 계속된 휘발작용(volatilization)에 의해 토양의 수분 분포의 변화로 인한 토양의 전기적 성질(전기전도도)의 변화에 기인한 것으로 사료된다.

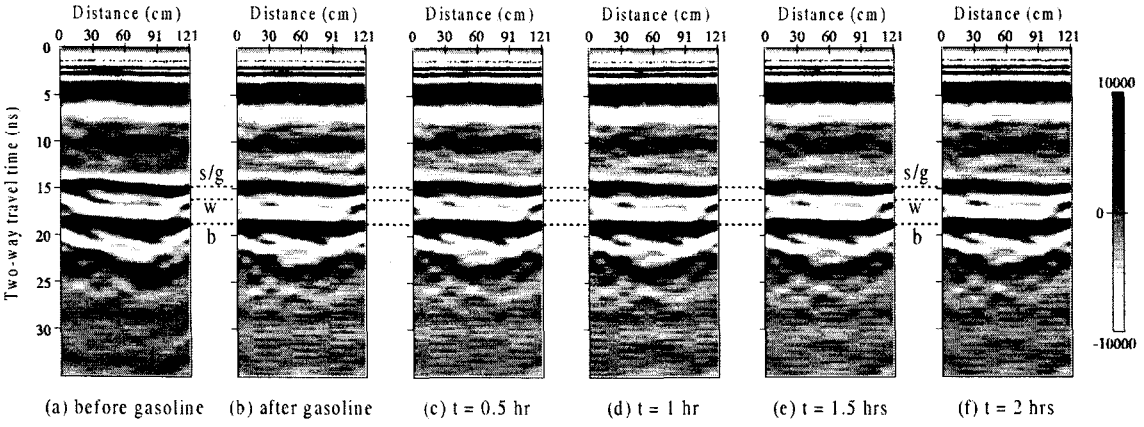

Fig. 4. 2-D GPR profiles sections before and after gasoline fill showing a change in the GPR profile over the gasoline in the vadose zone as a function of time. (a) at a water level of 7.6 cm as a background measurement before introduction of gasoline, and (b) to (f) at a liquid level of 17.8 cm after introduction of gasoline to the tank. s/g: sand-gravel interface, w: geophysical water table, b: tank bottom.

4. 결 론

탱크 모델 실험 결과 다공성 매질의 수분함량 변화에 대한 GPR의 민감성과 지하수면의 변화 관측에의 GPR 유용성이 입증되었다. 또한, free phase 휘발유 위의 vadose zone에서 관측된 GPR signal의 감쇠는 기체 상태의 휘발유가 vadose zone 내에 존재하는 수분을 공간적으로 재배치하며 치환함으로써 시간에 따라 변화하는 GPR 반응을 유도하는 것으로 해석되었다. 본 연구 결과, residual phase의 휘발유가 지하수로 포화된 매질 내에 분포 시, 단순히 지하수로만 포화된 매질보다 더 많은 전자기파의 에너지를 통과시킴으로써 획득된 GPR 자료

에서 현저히 향상된 radar signal이 탐지되었다. 그리고, 유기 석유화학 물질의 오염이 실험에 simulation된 유사한 환경 오염 지역에서 GPR를 이용한 LNAPL 오염을 탐지할 수 새로운 탐사 전략이 제시되었다.

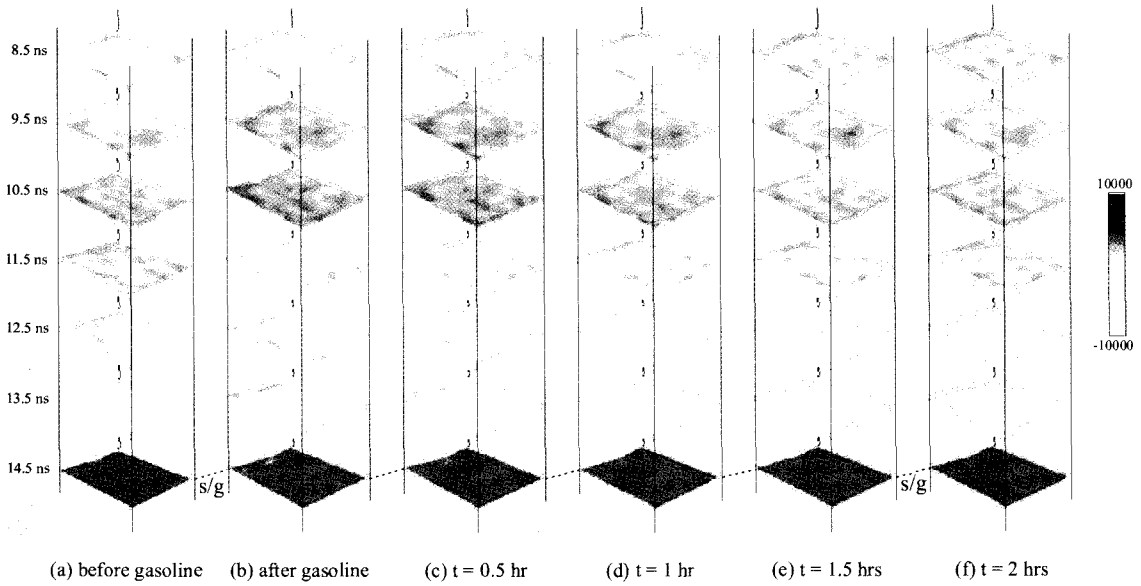

Fig. 5. 3-D time slices of the GPR data before and after gasoline introduction showing a change in the GPR response (8.5-11.5 ns) over the gasoline in the vadose zone as a function of time. (a) at a water level of 7.6 cm as a background measurement before introduction of gasoline, and (b) to (f) at a liquid level of 17.8 cm after introduction of gasoline to the tank. s/g: sand-gravel interface.

사 사

저자는 U.S. EPA, region V, Technical Support Section, Dr. Jeffrey Daniels, 그리고 Mark Vendl에 대해 이 연구사업을 지원해 준 것에 심심한 감사를 표합니다.

참고문헌

Barber, W. B., and Morey, R., 1994, Radar detection of thin layers of hydrocarbon contamination: *Proc. of the 5th International Conference on Ground Penetrating Radar*, **1**, Waterloo Center for Groundwater Research, Waterloo, Ontario, 1215-1228.

enson, A. K., 1995, Applications of ground penetrating radar in assessing some geological hazards: Examples of groundwater contamination, faults, cavities: *Journal of Applied Geophysics*, **33**, 177-193.

Beres, M. Jr., and Haeni, F. P., 1991, Application of ground-penetrating-radar methods in hydrogeologic studies: *Ground Water*, **29**, 375-386.

Campbell, D. L., Lucius, J. E., Ellefsen, K. J., and Deszcz-Pan, M., 1996, Monitoring of controlled LNAPL spill using ground-penetrating radar: *Proc. of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, EEGS, Englewood, Colorado, 551-517.

Daniels, J. J., Roberts, R., and Vendl, M. A., 1992, Site studies of ground penetrating radar for monitoring petroleum product contaminants: *Proc. of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, EEGS, Englewood, Colorado, 597-609.

Daniels, J. J., Roberts, R., and Vendl, M. A., 1995, Ground penetrating radar for the detection of liquid contaminants: *Journal of Applied Geophysics*, **33**, 195-207.

Davis, J. L., and Annan, A. P., 1989, Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy: *Geophysical Prospecting*, **37**, 531-551.

DeRyck, S. M., Redman, J. D., and Annan, A. P., 1993, Geophysical monitoring of a controlled kerosene spill: *Proc. of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, EEGS, Englewood, Colorado, 5-19.

Douglas, D. G., Burns, A. A., Rino, C. L., and Maresca, J. W., 1992, A study to determine the feasibility of using a ground penetrating radar for more effective remediation of subsurface contamination: USEPA Contact No. 68-03-3409, *USEPA Risk Reduction Engineering Laboratory Office of Research and Development*, Cincinnati, OH, 115 p.

Grumman, D. J., and Daniels, J. J., 1995, Experiments on the detection of organic contaminants in the vadose zone: *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, **0**, 31-38.

Maxwell, M., and Schmock, J., 1995, Detection and mapping of an LNAPL plume using GPR: A case study: *Proc. of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, EEGS, Englewood, Colorado, 15-23.

Olhoeft, G. R., 1986, Direct detection of hydrocarbon and organic chemicals with ground penetrating radar and complex resistivity: *Proc. of the NWWA/API Conference on Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water – Prevention, Detection and Restoration*, National Water Well Association, Dublin, Ohio, 284-305.

Peters, L. Jr., Daniels, J. J., and Young, J. D., 1994, Ground penetrating radar as a subsurface environmental sensing tool: *Proc. of the IEEE*, **82**, 1802-1822.

van Overmeeren, R. A., 1994, Georadar for hydrogeology: *First Break*, **12**, 401-408.