

유류오염물질의 GPR 반응에 대한 모델 실험 연구

김창렬*

*농업기반공사

Experiments on the GPR Responce of the Organic Hydrocarbons

Changryol Kim*

*Korea Agricultural & Rural Infrastructure Corporation, Anyang 430-600, Korea

A physical model experiment was conducted using a sand and gravel-filled tank model, to investigate the influence on the GPR response of LNAPL vapor phase effects in the unsaturated zone and of residual phase of LNAPL trapped in the saturated zone. Background measurements of GPR were made with only water in the tank using a fluctuating water table model. Gasoline was, then, injected into the bottom of the model tank to simulate a subsurface discharge from a leaking pipe or tank at depth, obtaining GPR data with rising and lowering of water table. Results from the experiment show the GPR sensitivity to the changes in the moisture content in the vadose zone and its effectiveness for monitoring minor fluctuation of the water table. The results also demonstrate a potential of GPR for monitoring 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 residual LNAPL contamination in the water-saturated system at field sites where the conditions are similar to those simulated in the physical models described herein.

Key words : GPR, vapor phase effects, residual phase, LNAPL

휘발유와 같은 유기탄화수소계 오염 물질인 유류가 지하 분포 시, 불포화대에 분포하는 가스상(또는 증기상) 유류와 지하수 포화대에 포획되어있는 잔류상 유류 오염 물질이 GPR (Ground Penetrating Radar)에 미치는 반응을 조사하기 위하여 모델 실험을 수행하였다. 모델 실험에는 모래와 자갈을 토양 매질로서 채운 탱크를 이용하였고, 유류 수송을 위한 매설 파이프 또는 지하 유류저장탱크로부터 유류의 누출을 모사하기 위하여 모델 탱크 바닥으로부터 물과 휘발유를 주입 또는 배출하여 지하수면의 상승과 하강을 유도하면서 다양한 상의 LNAPL 지하분포를 모사하여 GPR 측정을 실시하였다. 본 연구 결과, 불포화대에서 매질의 수분함량 증가에 따른 레이더 파의 속도 감소를 보이는 민감한 GPR 반응이 관측되었으며, 지하수면의 상승과 하강에 따른 지하수면 위치 변화 관측에 있어서 GPR의 유용성이 입증되었다. 본 연구에서 모관대를 형성하고 있는 매질의 대수층에서는 실제 지하수면 대신 모관대의 상부가 지구물리학적 지하수면으로 탐지되었다. 또한 휘발유 주입 이후 형성된 불포화대내 가스상 LNAPL은 매질의 전기적 성질의 변화를 유도하여 레이더 파의 감쇠를 야기하는 GPR 반응을 나타내었다. 포화대 내의 잔류상 LNAPL에 대한 GPR 반응은 레이더 파의 매질내 속도 및 에너지 투과성을 향상시킴으로써 지하수면 상승으로 포화대에 포획된 잔류상 유류오염물질을 포함하는 대수층 지역의 탐지 가능성을 보여 주었다. 이는 유류오염물질이 지하수면 아래의 포화대에 잔류상의 형태로 분포하는 오염지역에서 GPR를 이용하여 유류오염지역을 탐지할 수 있는 새로운 탐사전략의 근거를 제공한다.

주요어 : 불포화대, 가스상(증기상) 유류, 잔류상 유류, GPR, 포화대

1. 서론

GPR 탐사방법은 고주파수(10 MHz~1 GHz)의 전자기파를 이용, 천부지하의 고해상도의 영상을 제공하여 최근 토목공학 및 환경 등의 응용 분야에서 광범위하게 사용되고 있다(Benson, 1995; Beres and Haeni, 1991; Davis and Annan, 1989, Peters *et al.*, 1994; van Overmeeren, 1994). 또한 GPR 탐사방법은 수리지질분야에서 지하수면 탐지와 더불어 특정 조건하에서 천부 지하에 분포하는 유기 석유화학 오염물질의 탐지에 유용한 지구물리 탐사방법으로 이용되고 있다.

최근 20여년동안 GPR를 이용하여 유기탄화수소계 오염물질인 LNAPL (Light Non-aqueous Phase Liquid) 탐지에 관한 연구가 여러 학자들에 의하여 수행되어왔다. 이들의 LNAPL 탐지에 관한 연구는 주로 (1) 이론적 모델 수립(Barer and Morey, 1994; Douglas *et al.*, 1992), (2) 실험실 및 모델 탱크 실험(Daniels *et al.*, 1995; DeRyck *et al.*, 1993), (3) 조절된 야외 실험(Campbell *et al.*, 1996; Daniels *et al.*, 1992), (4) 실제 현장 적용(Daniels *et al.*, 1995; Gruman and Daniels, 1995; Maxwell and Schmock, 1995; Olhoef, 1986) 등의 방법을 통하여 이루어져 왔으며, 이들의 다양한 연구 방법은 LNAPL 탐지에 있어 중요한 정보를 제공하고 있다. GPR를 이용한 LNAPL의 탐지는 지하수면 위의 자유상 LNAPL(또는 LNAPL pool) 부근의 모관대와 불포화대에서의 이상 반응을 조사하는 데 중점을 두고 있다. 이상 반응의 조사 방법으로서 LNAPL 오염지역에서 레이더 반사파의 도착시간의 변화, 반사파의 세기 변화, 그리고 반사파 신호의 감

쇠 등의 조사가 이용되고 있다. 현재까지 발표된 연구는 여러 특정 오염 환경 하에서 LNAPL 탐지 가능성에 관한 메카니즘은 제시하였지만, 지하수 포화대에 포획된 잔류상 유류오염물질 탐지를 위한 전략에 관한 연구는 전무한 현실이다.

본 연구는 휘발유, 등유, 혹은 경유와 같은 LNAPL의 지하 분포 시, 지하수면 위 불포화대 내에 분포할 수 있는 가스상 LNAPL과 지하수면의 상승에 의해 포화대 내에 포획된 잔류상(residual phase) LNAPL의 오염환경을 모사하고, 이들이 GPR에 미치는 반응을 조사하여 이들이 분포하는 유류 오염 지역에서 GPR를 이용한 탐지 방법을 모델 탱크 실험을 통하여 확립하는데 목적이 있다. 본 연구의 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 지하수 포화대가 유류 물질의 잔류상으로 오염된 지역을 모사하였다.

2. 실험 방법

상기 언급한 포화대내 잔류상 및 불포화대내 가스상 LNAPL의 탐지를 위하여 모래와 자갈을 채운 모델 탱크, 그리고 물과 휘발유를 사용하여 LNAPL의 지하오염분포를 수리지질학적으로 모사하고 GPR 측정을 실시하여 모델 실험을 수행하였다. Fig. 1은 모델 탱크의 모식도를 나타낸다. 모델 탱크는 두께 1.5 cm인 폴리에틸렌 재질의 직경 242 cm 그리고 높이 121 cm의 원통

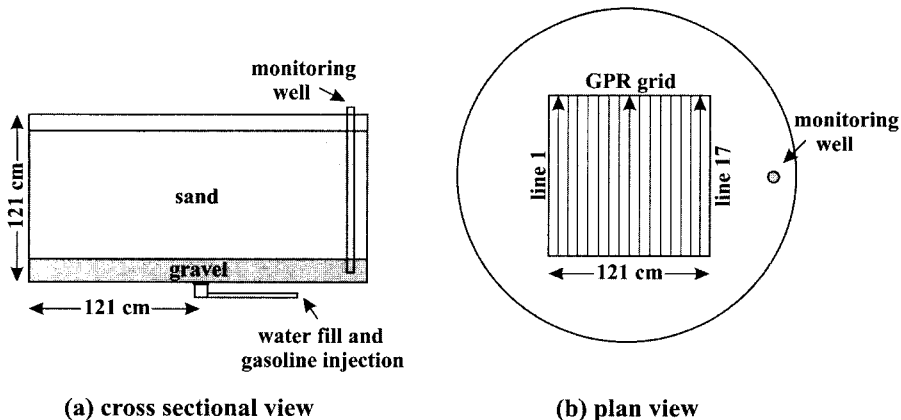


Fig. 1. Configuration of model tank and GPR measurement grid. (a) cross sectional and (b) plan view. Sand layer is 90 cm thick and gravel layer is 16.5 cm thick.

형 탱크를 사용하였고, 높이 약 50 cm의 목재 건조물 위에 설치하였다. 탱크 바닥 중앙에는 물과 휘발유의 주입 또는 배출을 위한 통로를, 탱크 벽 주위에는 수위 측정을 위한 관측정(직경 5 cm)을 설치하였다.

다공질 대수층을 모사하기 위한 매질로서 자연상태에서 건조된 모래와 자갈을 사용하였으며 탱크 바닥에는 두께 16.5 cm의 장식질이 우세한 콩자갈(입도 0.64~0.95 cm)을, 그 위는 두께 90 cm의 석영질 모래(입도 0.5~1 mm)를 채워 모델 탱크를 구성하였다. 실험실에서 측정된 자갈과 모래의 대한 공극율은 각각 36%와 31%이며, 불포화대에서 이들 매질에 대한 물의 잔류포화도는 각각 7~9%와 9~11%가 측정되었다. 또한 지하수면 위에 형성된 모관대(capillary fringe, 불포화대의 최하부층)의 두께는 모래에서 물에 대하여는 11.4 cm, 휘발유에 대하여는 6.4 cm가 관측되었으나 자갈에서는 모관대 형성이 관측되지 않았다. 모델 탱크 바닥에 놓인 자갈층은 그 위의 모래층보다 투수성 뛰어나므로, 이는 바닥의 통로를 통한 물과 휘발유의 주입 또는 배출, 그리고 모델 탱크로 물 주입 이후 수면의 수평적인 상승과 하강을 용이하게 하는 역할을 하였다.

모델 실험 기간 동안 탱크 내 매질의 건조를 방지하기 위하여 모래층 위에 플라스틱 커버를 설치하였으며, GPR 측정은 이 플라스틱 커버 위에서 길이 121 cm의 서로 평행한 17개 축선(축선 간격 7.62 cm)을 따라 실시하였다(Fig. 1(b)의 GPR 격자 참조). 이러한 조밀한 축선 간격에서 취득된 고밀도의 GPR 자료는 3차원 영상자료를 만들기 위한 기초자료로 사용하였다. GPR 측정 장비는 미국 GSSI(Geophysical Survey System,

Inc.)사의 SIR-10A와 중심 주파수(center frequency) 500 MHz의 안테나(GSSI Model 3101 bistatic antenna)를 사용되었다. 안테나는 Fig. 2에서와 같이 특별히 제작된 안테나 궤도를 따라 이동함으로써 각각의 축선을 따라 GPR 측정이 정확히 반복될 수 있도록 하였다. 본 연구를 위한 실험은 다음의 연속적인 두 모델 실험으로 구성되어 있다.

2.1. 모델 실험 1: 지하수면의 상승 및 하강 (Fluctuating Water Table Model)

첫 번째 모델 실험은 지하수위 변화 관측에 대한 GPR의 적합성 조사 및 불포화대에서 수분 함량 변화에 따른 GPR의 민감성 조사에 중점을 두었다. 초기 GPR 측정은 모델 탱크로의 물 주입 전 매질이 건조한 상태에서 수행되었고, 이어서 탱크 바닥의 통로를 통해 물을 주입하여 높이 66 cm까지 수면 상승을 유도하였다. 수위 상승 도중 세 단계의 수위(25.4, 35.6, 66 cm)에서 GPR 측정을 실시하였다. 수위 66 cm에서 GPR 자료를 취득한 후 탱크 내의 물을 배수, 수위를 하강시켜 모델 탱크 내의 모래층 및 자갈층에 잔류상의 물(residual phase of water)이 남겨지도록 유도하였다. 두 번째 모델 실험에서 휘발유를 모델 탱크로 주입하기 전 탱크 내 매질이 잔류포화도(residual saturation)의 물을 함유하게 함으로써 자연상태와 유사한 대수층을 형성하도록 유도하였다. 또한 수위 하강 도중 세 단계의 수위(30.5, 13.8, 0 cm)에서 GPR 측정을 수행하여 자료를 취득하였다. 수위의 상승과 하강 도중 각 단계의 수위에서 GPR 자료 취득 시 탱크 내의 매질이 평형 상태에 도달하는 동안 발생할 수 있는 변화를 조사하기 위하여 5~6번의 GPR 측정을 17개 축선 전체에 대하여 30분 간격으로 반복하였다. 또한 첫 번째 모델 실험에 취득된 GPR 자료는 다음 모델 실험 자료와의 비교를 위한 배경 자료로 활용되었다.

2.2. 모델 실험 2: 휘발유 주입 후 지하수면의 상승 및 하강 (Fluctuating Water Table Model with Gasoline Injection)

두 번째 모델 실험에서는 유류 수송을 위한 지하 매설 파이프 혹은 지하 유류저장탱크로부터 지하수면으로의 LNAPL 누출을 모사하였다. 모델 탱크의 바닥을 통하여 휘발유를 주입한 후, 물을 사용하여 수면의 상승과 하강을 유도하였고, 이를 통해 형성된 불포화대내 가스상 LNAPL 및 포화대내 잔류상 LNAPL에 대한 GPR의 반응을 조사하였다. 본 실험에서 수리지질학적



Fig. 2. Model tank and GPR antenna with a survey wheel on the antenna track. GPR measurements were made using an antenna positioned at the tank surface guided by a track to assure accuracy along the GPR grid lines.

오염환경은 지하 매설된 유류 수송용 파이프 또는 지하 유류저장탱크로부터 지하수면으로의 LNAPL 누출로 인한 대수층의 오염 후 지하수면이 상승하거나, 누출한 LNAPL이 지하수면을 따라 이동하면서 휘발성유기화합물(VOC, volatile organic compound)로 인한 불포화대의 오염 및 뒤따른 지하수면의 상승으로 인해 포화대내 남겨진 잔류상 LNAPL로 오염된 지역을 모사하였다.

모델 탱크로의 휘발유 주입 이전, GPR 측정 시 수위 7.6 cm의 물이 탱크 바닥의 자갈층 내에 남아 있는 것이 관측되었다. 이 물은 모델 실험 1의 배수 이후(약 16시간 경과) 탱크의 바닥으로 이동하여 축적된 것으로 탱크 내 매질에 남아 있던 잔류포화도의 초과분으로 사료된다. GPR 자료 취득 후 불포화대내의 가스상 LNAPL만에 의한 GPR 반응을 조사하기 위하여 지하수면 밑에서의 LNAPL 누출을 유도하였다. 이를 위하여 219 리터의 휘발유를 모델 탱크에 주입하여 물로 포화된 자갈층을 경유, 탱크 내 지하수면 위로 유도하였다. 휘발유 주입 후, 휘발유의 높이는 17.8 cm로 관측되었으며, 가스상 LNAPL의 반응을 관찰하기 위하여 GPR 측정을 실시하였다. 자료 취득 후, 탱크 바닥 통로를 통하여 물을 주입하여 휘발유 높이 73.7 cm까지 수위 상승을 유도하였다. 수위 상승 도중 2단계의 휘발유 높이(53.3, 73.7 cm)에서 GPR 자료를 취득하였다. GPR 측정 후, 탱크로부터 물과 휘발유를 배출하여 수위 하강을 유도하였으며, 수위 하강 도중 세 단계의 휘발유 높이(34.3, 7.6, 0 cm)에서 GPR 측정을 실시하였다. 물과 휘발유의 배출 후, 탱크에는 잔류포화도의 물과 휘발유가 모래와 자갈층에 남겨져있다. 여러 단계에 걸친 수위의 상승과 하강 도중, 각 단계에서 시간에 따른 오염물질의

GPR에 대한 반응 변화를 조사하기 위하여 실험 1과 같은 방법으로 5~6번의 GPR 측정을 17개 축선 전체에 대하여 30분 간격으로 반복하여 자료를 취득하였다.

3. 연구 결과 및 고찰

모델 탱크 내 대수층의 지하수위 상승 및 하강 도중 여러 단계의 수위에서 실시된 각각의 GPR 측정에서는 총 17개 축선에서 자료를 취득하였으나 자료 해석 결과가 17개 축선 모두에서 거의 동일하여 본 논문에서 사용된 2차원단면은 하나의 축선에서 취득한 자료만을 선정하여 사용하였다.

3.1. 모델 실험 1: 지하수면의 상승 및 하강 (Fluctuating Water Table Model)

Fig. 3은 탱크 모델 실험1에서 수위의 상승과 하강 도중, 각 단계의 수위에서 취득한 GPR 자료의 2차원 단면 및 레이더파의 주요 반사면(지하수면, 모래-자갈층 경계면, 탱크바닥)을 나타낸다. 지하수면이 모델 탱크 바닥의 자갈층 내에 위치하고 있을 경우(Fig. 3(f))는 모관대가 존재하지 않으므로 포화대 상부에서의 레이더 반사파는 지하수면에서 반사된 파이나, 지하수면이 모래층 내에 위치하고 있을 경우, 포화대 상부에서의 레이더 반사파는 수리지질학적인 지하수면이 아니고 그 위에 형성된 모관대에서 반사된 것이 GPR 2차원단면 상에 기록되었다(Fig. 3(b)~(e)). 이는 모관대에서의 수분 함량(또는 물의 포화도)이 100%에 가깝고 모관대 위의 불포화대와 현격한 유전 상수(dielectric permittivity)의 차이를 보이기 때문이며, 반면 지하수면 상하에서의 유전 상수의 차이는 매우 미약하여 지

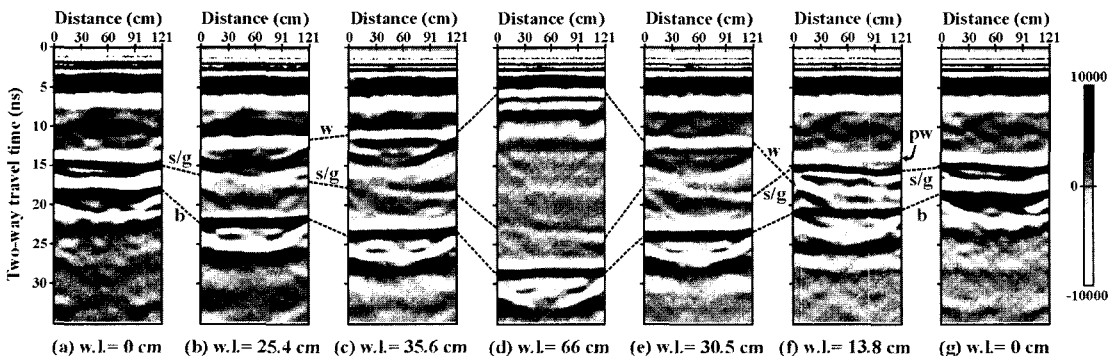


Fig. 3. 2-D GPR profile sections at different water levels from the fluctuating water table model (s/g: sand-gravel interface, b: tank bottom, w: geophysical water table, pw: perched water table, w.l.: water level).

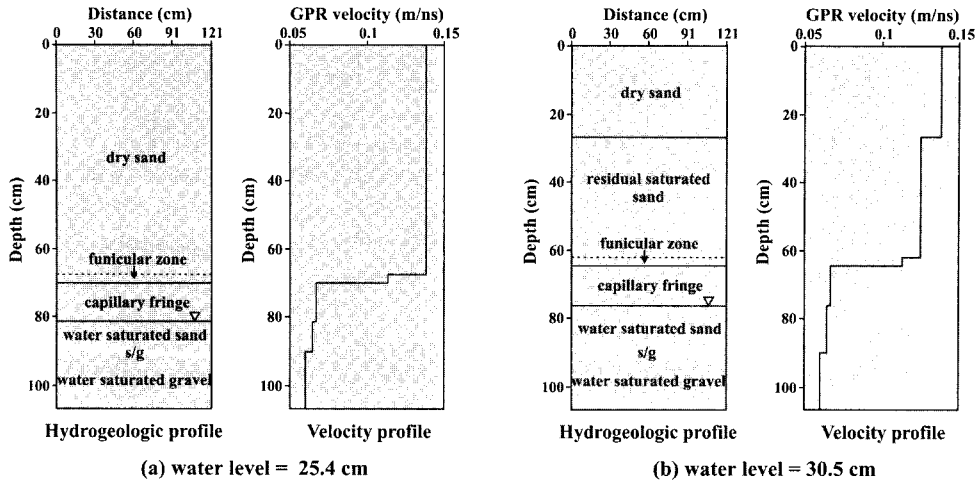


Fig. 4. Profiles of hydrogeologic layers and GPR velocity with depth at (a) a water level of 25.4 cm and (b) a water level of 30.5 cm (s/g: sand-gravel interface, ∇ : water table).

하수면에서 레이더파의 반사가 일어나는 경우는 극히 드물기 때문이다. 그러므로, 대부분의 경우 지하수면 위에 모관대가 형성되어 있는 대수층의 토양 매질에서는 모관대 상부가 지구물리학적 지하수면(geophysical water table)으로 GPR 탐사에서 탐지되고 있다(Annan *et al.*, 1991; Kim, 2001). Fig. 3의 2차원단면에서 도시된 각 단계의 지하수면에서의 레이더 반사파는 지하수면의 상승 및 하강을 모사한 모델 실험에서 지하수면의 수직적인 위치 변화에 대한 GPR의 탐지력을 잘 보여주고 있다.

모래-자갈층 경계면으로부터의 레이더 반사파는 경계면이 지하수면 위에 위치할 경우는 레이더 입사파와 같은 극성(polarity)을 보이며(Fig. 2(a), (f), (g)), 반면에 이 경계면이 지하수면 아래에 위치할 경우의 반사파는 입사파와는 반대의 극성(reversed polarity)과 상대적으로 약한 신호를 보이고 있다(Fig. 2(b), (c), (d), (e)). 반사파 극성의 변화는 경계면 위로 수위가 위치할 경우 경계면 상하의 매질에서 유전상수 크기가 역전되어 발생된 결과이며, 레이더파 신호의 감소는 물로 포화된 모래층을 통과하는 레이더파의 에너지 감소에 따른 레이더 반사파세기의 변화 때문이다.

Fig. 3(e)의 수위 30.5 cm에서 지구물리학적 지하수면까지의 왕복거리(two-way travel distance)는 Fig. 3(b)의 수위 25.4 cm에서 같은 반사면까지의 왕복거리보다 작음에도 불구하고 왕복시간(two-way travel time)은 두 경우 모두 거의 비슷하게 탐지되었다. 이는 Fig. 3(b)의 탱크 모델 대수층에서 모관대 위의 불포화대가 건조한 모래층으로 구성되어 있는 반면에 Fig.

3(e)의 탱크 모델 대수층에서 모관대 위의 불포화대가 잔류포화도(약 10%)의 물을 함유하고 있는 모래층으로 구성되어 이를 통과하는 레이더파의 속도가 둔화되어 이 반사면까지의 왕복시간이 상대적으로 길어졌기 때문이다. 이는 GPR이 대수층의 수분함량 변화에 매우 민감히 반응하고 있음을 보여 주고 있다(Greaves *et al.*, 1996; Kim, 2001). Fig. 3(b)와 Fig. 3(e)의 수위 단계에서 탱크 모델 대수층의 수리지질단면도 및 레이더파의 속도 분포도가 Fig. 4에 도시되었다.

3.2. 모델 실험 2: 휘발유 주입 후 지하수면의 상승 및 하강(Fluctuating Water Table Model with Gasoline Injection)

Fig. 5는 모델 탱크로의 휘발유 주입 이전과 이후, 그리고 이어진 수위 상승과 하강 도중, 각 단계의 수위 또는 휘발유 높이(liquid level)에서 측정된 GPR 자료의 2차원단면 및 레이더파의 주요 반사면을 나타낸다. 휘발유 주입(Fig. 5(b)) 이후, 지하수면의 상승 시 토양 입자에 대한 물의 젖음성(wettability)이 휘발유의 젖음성보다 크기 때문에 일부의 휘발유는 모래층에서 지하수면 밑의 포화대의 공극 내에 고립된 물방울(isolated blob)의 형태인 insular saturation의 잔류상으로 분포하고, 나머지 휘발유는 지하수면과 함께 상승한다(Fetter, 1993; Wilson and Conrad, 1984). Mercer와 Cohen (1990)에 의하면 포화대에서 유기 석유 화학 물질의 잔류포화도는 매질의 종류 및 분급정도에 따라 15~50%의 범위를 갖는 것으로 알려져 있다. 본 실험에서 모래층의 포화대 내에 잔류상 휘발유가 분포하는 단계는

Fig. 5(c)~(e)의 단계이다.

모델 실험 1에서는 모래층 내에 지하수면이 위치할 경우 불포화대에 모관대가 형성되었지만, 휘발유와 함께 지하수면이 상승 또는 하강하는 모델 실험 2에서는 모래층 내에 위치한 지하수면 위의 휘발유에 의한 공극압이 작용하여 모관대가 형성되지 않을 것으로 사료된다. 따라서 모델 실험 1과는 달리 자유상 휘발유 밑에 위치하는 지하수면이 모델 실험 2의 GPR 측정에서는 지구물리학적 지하수면으로 탐지되었다.

모래-자갈층 경계면으로부터의 레이더 반사파는 모델 실험 1에서와 같은 경향의 반사파 극성을 나타내며, 경계면이 지하수면 위에 위치할 경우는 레이더 입사파와 같은 극성(Fig. 5(a), (b), (f), (g))을, 반면에 이 경계면이 지하수면 아래에 위치할 경우는 입사파와는 반대의 극성(Fig. 5(c), (d), (e))을 보인다. 지하수면 위의 휘발유로 포화된 매질에서의 레이더파의 반사는 휘발유로

포화된 매질(휘발유 모관대 포함)과 그 위의 매질(잔류 포화도의 물, 혹은 잔류포화도의 물과 휘발유를 포함하는 매질) 사이의 유전 상수 차이가 미소(휘발유의 유전 상수=2~3, 공기의 유전상수=1)하여 레이더파의 반사가 탐지되지 않았다.

3.3. 불포화대내 가스상 LNAPL에 대한 GPR 반응

Fig. 6의 2차원단면은 모델 탱크로의 휘발유 주입 이전과 이후에 불포화대에서 약 2시간에 걸친 GPR 반응의 변화를 나타내고 있다. 휘발유 주입 이후, 반사파 왕복 시간 8~13 ns (nanosecond) 부분에서 레이더파의 세기가 시간에 따라 감소하고 있는 것이 Fig. 6 (b)에서 (f)에 이르는 2차원단면에서 관측되었다. 이 현상은 Fig. 7의 3차원 time slice 자료(왕복시간 9~11 ns)에서도 현저히 나타나고 있다(Fig. 6 (b)~(f)). LNAPL 오염지역의 불포화대에서 레이더파 세기의 감소는 그동안 여

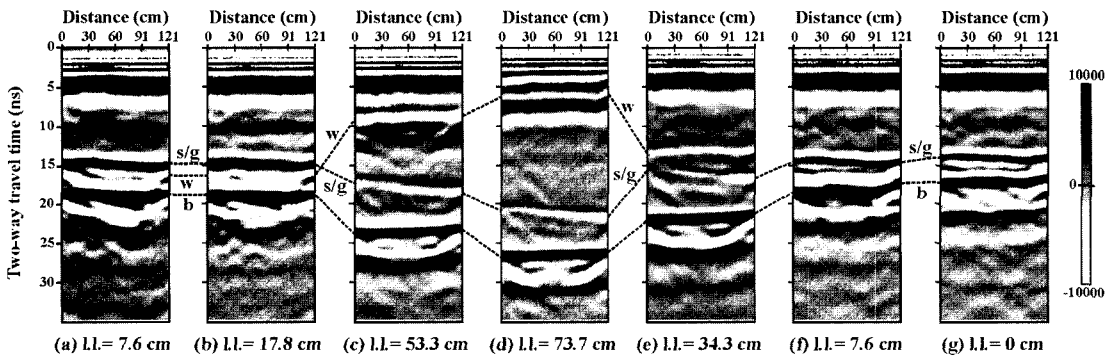


Fig. 5. 2-D GPR profile sections at different liquid levels from the fluctuating water table model with gasoline injection (s/g: sand-gravel interface, w: geophysical water table, b: tank bottom, l.l.: liquid level).

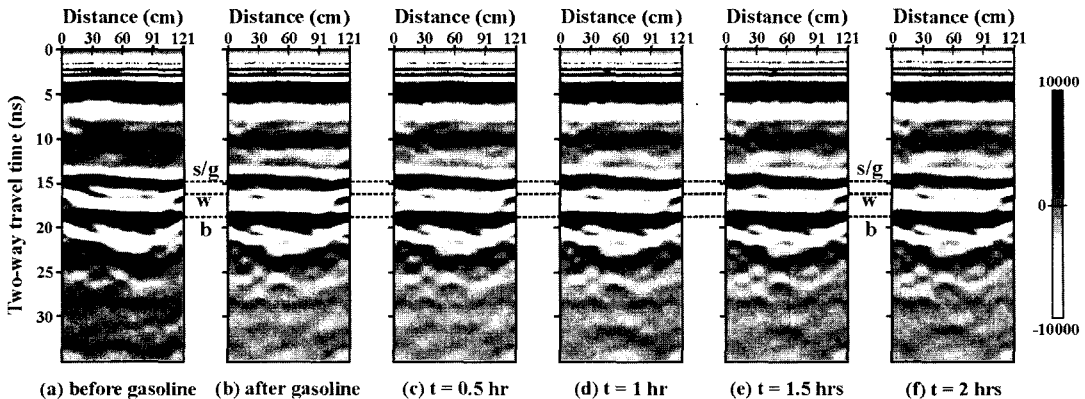


Fig. 6. 2-D GPR profiles sections before and after gasoline injection showing a change in the GPR response over the gasoline in the vadose zone as a function of time (a) at a water level of 7.6 cm as a background measurement before introduction of gasoline, and (b) to (f) at a liquid level of 17.8 cm after introduction of gasoline into the tank (s/g: sand-gravel interface, w: geophysical water table, b: tank bottom).

러 학자들에 의해 보고된 바 있으며, 이러한 불포화대에서 레이더파의 감쇠는 “white-out area” 혹은 “blurred area” 등으로 불리어 왔다(Douglas *et al.*, 1992; Daniels *et al.*, 1995; Gruman and Daniels, 1995; Maxwell and Schmock, 1995). 이들에 의하면 불포화대에서 레이더파 세기의 감쇠 원인은 (1) 가스상 LNAPL에 의한 효과, (2) 불포화대의 잔류상 LNAPL에 의한 효과 등으로 분석 또는 해석되어왔다. 최근에는 불포화대에서 LNAPL에 대한 미생물의 생분해에 의한 전기전도도의 증가로 인한 레이더파 세기의 감쇠가 보고

되었다(Lucius, 2000; Nash *et al.*, 1997). 본 모델 실험에서는 휘발유가 모델 탱크의 바닥으로부터 주입되었고, GPR 측정 시 불포화대에는 가스상 이외의 다른 상(phase)의 휘발유가 존재하지 않았으며, 단지 잔류상의 물만이 분포하고 있었다. 또한 GPR 측정기간이 미생물의 생분해가 진행될 만큼 시간이 소요되지도 않았다. 그러므로, 모델 탱크 내 불포화대에서 관찰된 레이더파의 감쇠 현상은 휘발유의 구성성분 중 BTEX (Ben-zene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene)와 같은 휘발성 유기화합물의 계속된 휘발작용에 의해 공극내 가스압력(vapor

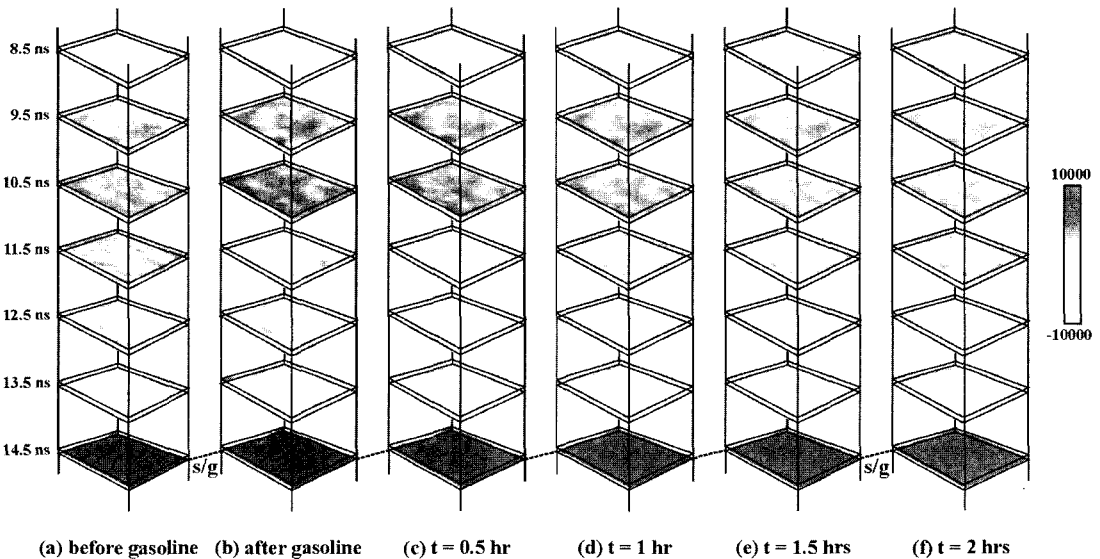


Fig. 7. 3-D time slices of the GPR data before and after gasoline introduction showing a change in the GPR response (8.5–11.5 ns) over the gasoline in the vadose zone as a function of time (a) at a water level of 7.6 cm as a background measurement before introduction of gasoline, and (b) to (f) at a liquid level of 17.8 cm after introduction of gasoline into the tank (s/g; sand-gravel interface).

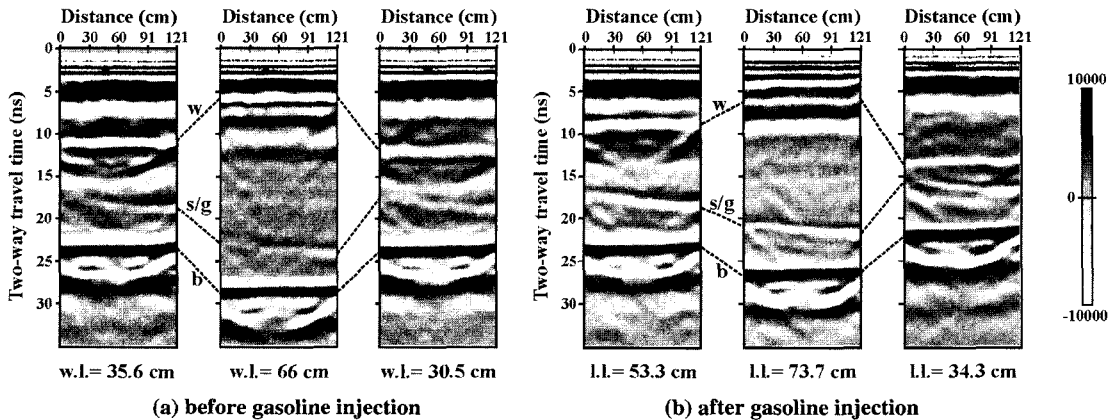


Fig. 8. 2-D GPR profile sections showing the effect of residual LNAPL on the GPR response (s/g; sand-gravel interface, b; tank bottom, w; geophysical water table, w.l.: water level, l.l.: Liquid level).

pressure)의 변화가 토양의 수분 분포를 재배치함으로써 변화를 야기하여 토양의 전기적 성질(전기전도도)을 변화시킨 것으로 사료된다.

3.4. 포화대내 잔류상 LNAPL에 대한 GPR 반응

Fig. 8은 모델 실험 1과 2에서 지하수면이 모래-자갈층 경계면 위에 위치한 경우의 2차원단면을 비교한 것이다. 2차원단면의 모래-자갈층 경계면에서의 레이더 반사파의 세기가 모델 실험 2의 휘발유 주입 이후(Fig. 8(b))에 모델 실험 1의 휘발유 주입 이전(Fig. 8(a))보다 훨씬 강한 것이 탐지되었다. 휘발유 주입 이후의 모래층에는 잔류상 휘발유(잔류포화도 약 25%)가 포화대 내에 분포하고 있으며, 낮은 유전상수를 갖는 잔류포화도의 휘발유(유전상수=2~3)로 인해 물(유전상수=80)로만 포화된 모래층보다 낮은 유전상수 값을 갖는다. 그러므로, 잔류상 휘발유를 포함하는 포화된 모래층은 물론만 포화된 모래층보다 레이더 파의 속도가 높고, 더 많은 레이더 파의 에너지를 통과시킴으로써, 모래-자갈층 경계면에서 더 강한 레이더 파의 반사를 야기하고 있다. 이러한 효과는 잔류상 LNAPL이 포화대 내에 분포하는 유류오염지역의 탐지에 GPR이 유용하게 사용될 수 있음을 보여 주고 있다.

4. 결론

본 모델 탱크 실험에서는 자연적인 다공성 대수층을 모사함으로써 유기석유화학 오염물질인 LNAPL의 다양한 지하분포를 유도하여 불포화대의 가스상 LNAPL 및 포화대 내의 잔류상 LNAPL에 대한 GPR 반응을 조사하였다. 연구 결과, 지하수면의 상승과 하강을 모사한 모델 실험 1에서는 다공성 매질의 불포화대에서 수분함량이 증가함에 따라 레이더 파의 속도가 감소하는 GPR의 민감성이 관측되었으며, 지하수면의 상승과 하강에 따른 지하수면 위치 변화 관측에의 GPR 유용성이 입증되었다. 이 실험에서 모관대를 형성하고 있는 매질의 대수층에서는 실제 지하수면 대신 모관대의 상부가 지구물리학적 지하수면으로 탐지되었다. 휘발유 주입 이후의 모델 실험 2에서 불포화대내 가스상 LNAPL에 대한 GPR 반응은 자유상 휘발유에서 유도된 가스상의 휘발유가 불포화대 내 공극에 분포하는 수분을 공간적으로 재배치함으로써 시간에 따라 변화하는 매질의 전기전도도 변화를 야기하여 레이더파의 감쇠를 보여주었다. 그리고 지하수면 상승에 의해 잔류상 휘발유가 포화대 내에 포획되어 있을 경우, 단순

히 지하수로만 포화된 매질보다 많은 레이더 파의 에너지를 통과시킴으로써 획득된 자료에서 레이더 파의 세기가 현저히 향상된 GPR 반응이 탐지되었다. GPR을 이용한 유류의 탐지는 여러 요인에 의해 영향을 받을 수 있고, 현재도 연구해야할 여러 부분이 남겨져 있는 매우 어려운 과제 중의 하나이다. 본 연구를 통하여 모델 실험에서 모사된 환경과 유사한 오염 지역(유류 누출 후 지하수면의 상승 및 하강이 반복되는 지역)에서 GPR을 이용 레이더 파의 감쇠를 정밀히 분석함으로써 유류오염지역을 탐지할 수 새로운 탐사 전략이 제시되었다.

사 사

저자는 본 연구사업을 지원해 준 미국 환경청(U.S. Environmental Protection Agency)의 Region V, Technical Support Section 및 오하이오 주립대의 Dr. Jeffrey J. Daniels에 대해 심심한 사의를 포함합니다.

참고문헌

- Annan, A.P., Cosway, S.W. and Redman, J.D. (1991) Water Table Detection with Ground Penetrating Radar: 61st Annual International Meeting, Society of Exploration Geophysicists, Expanded Abstracts, E/G1.4, p. 494-496.
- 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. Waterloo Center for Groundwater Research, Waterloo, Ontario, v. 1, p. 1215-1228.
- Benson, A.K. (1995) Applications of Ground Penetrating Radar in Assessing some Geological Hazards: Examples of Groundwater Contamination, Faults, Cavities. Journal of Applied Geophysics, v. 33, p. 177-193.
- Beres, M. Jr. and Haeni, F.P. (1991) Application of Ground-Penetrating-Radar Methods in Hydrogeologic Studies. Ground Water, v. 29, n. 3, p. 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, p. 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, p. 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, v. 33, p.

- 195-207.
- Davis, J.L. and Annan, A.P. (1989) Ground-Penetrating Radar for High-Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, v. 37, p. 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, p. 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, Ohio, 115p.
- Fetter, C.W. (1993) *Contaminant Hydrogeology*. Macmillan Publishing Company, New York, 458p.
- Greaves, R.J., Lesmes, D.P., Lee, J.M. and Toksoz, M.N. (1996) Velocity Variations and Water Content Estimated from Multi-Offset, Ground-Penetrating Radar. *Geophysics*, v. 61, n. 3, p. 683-695.
- 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*, v. 0, n. 1, p. 31-38.
- Kim, C. (2001) A Physical Model Experiment on the Hydrogeologic Application of GPR, Ph.D. Thesis, The Dept. of Geological Sciences, The Ohio State University, Columbus, Ohio, 136p.
- Lucius, J.E. (2000) Detectability of Crude Oil in the Subsurface near Bemidji, Minnesota, Using Ground Penetrating Radar. Proc. of the Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems, EEGS, Englewood, Colorado, p. 311-319.
- 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, p.15-23.
- Mercer, J.W. and Cohen, R.M. (1990) A Review of Immiscible Fluids in the Subsurface: Properties, Models, Characterization and Remediation. *Journal of Contaminant Hydrogeology*, v. 6, p. 107-163.
- Nash, M.S., Atekwana, E. and Sauck, W.A. (1997) Geophysical Investigation of Anomalous Conductivity at a Hydrocarbon Contaminated Site. Proc. of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, EEGS, Englewood, Colorado, p. 675-683.
- 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, p. 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, v. 82, n. 12, p. 1802-1822.
- van Overmeeren, R.A. (1994) Georadar for Hydrogeology. *First Break*, v. 12, n. 8, p. 401-408.
- Wilson, J.L. and Conrad, S.H. (1984) Is Physical Displacement of Residual Hydrocarbons a Realistic Possibility in Aquifer Restoration?. Proc. of the NWWA/API Conference on Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water Prevention, Detection and Restoration, National Water Well Association, Worthington, Ohio, p. 274-298.