GPR을 이용한 상수관로의 누수 탐사

Detection of the Pipe Leak for Water Distribution System Using Ground Penetrating Radar

박인찬*·조원철**

Park, Inchan·Cho, Woncheol

요 지

지하레이다(Ground Penetrating Radar, GPR)를 이용하여 지표하의 상수관로를 지표에서 송신안테나와 수신안테나를 이용해서 손쉽게 측정하게 된다. 송신안테나는 지표하에 전자기파를 송신하고 지하 매질을 투과한 파가 수신안테나에 도달하는 시간을 측정하여 지표하 매질의 특성을 파악할 수 있다. 수신파의 도달시간은 지표하 매질의 특성에 따라서 변화하며, 이를 통해 지표하 매질과 매질 깊이 등을 파악할 수 있다. 일반적으로 상수관로를 매설할 경우 관로 주변의 토양은 균등하게 되므로 기 매설된 상수관로 주변에 누수가 발생하게 되면, 관로 주변의 토양은 포화상태이거나 수압으로 인해서 공동이 형성될 경우가 많다. 이때 반사에너지의 유전율 증가 혹은 감소 특성으로 인해서 주변 매질과는 매우 상이한 결과를 보이게 된다. GPR탐사는 단순히 반사된 신호진폭의 크기를 나타내며 이러한 반사에너지의 크기에 관계되는 것은 매설물의 유전율이 주위 지반이 갖는 유전율과의 차이에서 기인하기 때문이다. 탐사 대상 상수관로에 대한 정보를 확보하여 GPR 탐사를 수행한 결과 관로 탐사를 위한 GPR의 결과는 매우 유용하게 사용될 것으로 판단되며, 이를 바탕으로 누수 발생 이력이 있는 다양한 관로주변 조건을 대상으로 탐사를 실시할 경우 상수관망시스템의 효율적인 관리 및 보수에 매우 유용한 방법이 될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심단어 : GPR, 상수관로, 누수 탐사, 유전율

1. 서 론

우리나라의 상수도 보급률은 약 90 %에 이르러 관로의 신규 매설 등의 투자보다는 매설된 관로 및 상수관로시스템의 유지관리가 매우 중요한 시점에 이르렀다. 그러나 상수관로는 지하에 매설되는 특성으로 관로의 유지관리에서 매우 중요한 노후진척도 및 누수 등의 상태 파악이 어려워 적절한 시기에 효과적인 유지관리를 받지 못하고 있다. 실제 상수 관로의 파손 등 요인으로 인해 도심 지역 등과 같이 혼잡하고 교통량이 많은 지역의 경우, 굴착에 많은 어려움이 수반되며 또한 상대적으로 많은 경비가 요구되므로 누수음을 측정하는 탄성파 탐사, 누수탐지기 등의 기술이 주로 이용되고 있다. 본 연구에서는 현재 주로 이용되고 있는 음파 탐사법과는 다르게 지하에 매설된 관로 및 인공구조물의 수평·수직적 위치 및 구조물의 상태 등을 직접 굴착 등의 물리적 교란 없이 조사하기 위해 다양한 분야에서 사용되고 있는 지구물리탐사법 중의 하나인 지하레이다(Ground Penetrating Radar, GPR) 탐사를 적용하였다. GPR을 이용하여 지표하의 상수관로를 지표에서 송신안테나와 수신안테나를 이용해서 손쉽게 측정할 수 있으며, 송신안테나는 지표하에 전자기파를 송신하고 지하 매질을 투과한 파가 수신안테나에 도달하는 시간을 측정하여 지표하 매질의 특성을 파악할 수 있다. 수신파의 도달시간은 지표하 매질의 특성에 따라서 변화하며, 이를 통해 지표하 매질과 매질 깊이 등을 파악할 수 있다. 일반적으로 상수관로를 매설할 경우 관로 주변의 토양은 균등하게 되므로 기 매설된 상수관로 주변에 누수가 발생하게 되면, 관로 주변의 토양은 포화상태이거나 수압으로 인해서 공동이 형성될 경우가 많다. 이때 반사에너지의 유전율 증가 혹은 감소 특성으로 인해서 주변 매질과는 매우 상이한 결과를 보이게 된다. GPR탐사는 단순히 반사된 신호진폭의 크기를 나타내며 이러한 반사에너지의 크기에 관계되는 것은 매설물의 유전율이 주위 지반이 갖는 유전율과의 차이에서 기인하기 때문이다. 본 연구에서는 이와

* 정회원·연세대학교 대학원 토목공학과 박사과정·E-mail : icpark@yonsei.ac.kr - 발표자
** 정회원·연세대학교 사회환경시스템공학부 교수 ·E-mail : woncheol@yonsei.ac.kr

같은 상수관로 주변의 물리적 변화를 GPR을 활용하여 측정함으로써 새롭고 효과적인 누수 지점 탐사 연구를 수행하였다.

2. 지하매설물의 GPR 탐사 개념

GPR 시스템은 넓은 대역폭 전자파 에너지의 짧은 펄스 신호를 송신 안테나로부터 방사시켜 전자기적 물성이 다른 매질에 의해 발생하는 반사, 회절, 감쇠, 분산 등의 파동현상을 수신하여 지질 구조 및 성질에 대한 정보를 제공하는 탐사 장비이다. GPR 탐사의 기본적인 물리적 현상을 이용하여 지하매설물 및 주변의 포화도 조사에 적용될 경우의 GPR 탐사 개념도는 그림 1과 같다. 여기서 ε_r은 유전상수, v_r은 전자기파의 전파속도, 그리고 t_r은 파의 이동시간을 나타내며, 매질의 전기전도도에 따라서 전자기파가 하상에서 반사 혹은 투과되는 양상이다.

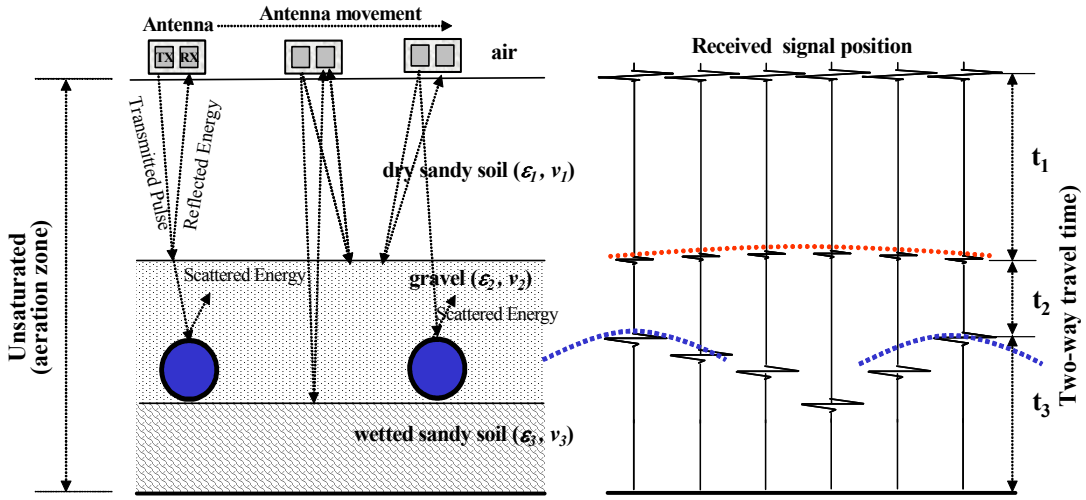

그림 1. GPR 개념도

수신되는 파에 상당하는 매질의 깊이를 알수 있다면 상대유전상수는 식 (1)에 의해서 결정된다. 여기서 ε_r는 매질의 상대유전상수, c는 자유공간상의 전자기파 전파 속도($3\times10^8 m/ns$), d 는 반사파가 수신된 깊이를 나타낸다.

$$\varepsilon_r = \left(\frac{c}{v}\right)^2 = \left(\frac{c\,t_r}{2\,d}\right)^2 \quad (1)$$

기존의 다양한 연구를 통해서 산정된 매질에 따른 전자기파의 전파를 지배하는 전기적 성질인 전기전도도와 유전상수, 파의 이동속도는 그 특성에 따라 표 1과 같다(Morey, 1974; Ulriksen, 1982; Annan, 1992). 표 1에 제시된 바와 같이 건조한 모래보다 포화된 모래가 큰 전기전도도와 상대적으로 작은 유전상수를 갖기 때문에 파의 이동시간이 매우 짧아지게 된다.

전기전도도는 파의 감쇠에 가장 큰 영향을 주는 요소이다. 즉, 식 (2)의 조건에 의해 지중 매질의 전기전도도에 따라서 전자파의 투과 심도가 결정된다. 전기전도도가 크면 클수록 감쇠는 더욱더 많이 발생하고 투과할 수 있는 깊이는 감소하게 된다. 송신안테나로부터 방사되는 에너지 또한 투과 가능 깊이의 중요한 인자이다. 저주파 안테나의 경우 방출되는 에너지가 고주파에 비해서 상대적으로 크기 때문에 투과할 수 있는 깊이가 고주파 안테나에 비해서 크다. 그러나 안테나의 투과 가능 심도가 깊어 질 경우 해상도는 낮아지는 단점이 있다. 건조한 토양과 포화된 토양의 상대유전상수 차이를 이용하여 식 (2) 및 (3)의 전자파 반사계수(R)와 전달계수(T)를 결정하게 된다. 반사계수는 원래 총 에너지에 대한 반사 전자기파 에너지 강도의 비율을 의미하고, 전달계수는 표면으로 되돌아오지 않고 매질 내부로 전달·확산되어 소산되어 버리는 파 에너지의 크기를 나타내는 척도이다. 그러므로 상대적으로 하상 매질의 유전상수 차이가 크면 클수록 매질 탐사에 유리하게 된다. 건조한 토양과 포화된 경우 상대유전상수는 표 1에 제시된 바와같이 매우 큰 차이가 있으므로 뚜렷한 반사파를 수신할 수 있게 된다.

표 1. 매질에 따른 전기적 특성치

매 질	전기전도도(μS/cm)[a)]	상대유전상수	속도(m/ns)
air	0	1	0.3
Fresh water	0.5	80	0.033
Granite, dry	0.01	5	0.13
Sand, dry	0.01	5	0.13
Clay, wet	500	10	0.095
Soils			
sandy, dry	1.4	2.6	0.19
sandy, wet	69	25	0.06
Clayey, dry	2.7	2.5	0.19
Clayey, wet	500	19	0.07

a) μS/cm의 단위는 microseimens per centimeter를 의미한다.

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_{r1}} - \sqrt{\varepsilon_{r2}}}{\sqrt{\varepsilon_{r1}} + \sqrt{\varepsilon_{r2}}} \quad (2)$$

$$T = 1 - R = \frac{2\sqrt{\varepsilon_{r1}}}{\sqrt{\varepsilon_{r1}} + \sqrt{\varepsilon_{r2}}} \quad (3)$$

여기서 ε_{r1}은 첫 번째 매질의 유전상수이고, ε_{r2}는 두 번째 매질의 유전상수이다.

상수관로 및 누수로 인한 토양 포화도 조사를 위한 GPR의 적용은 다양한 중심주파수를 이용해서 수행되어질 수 있지만, 일반적으로 높은 주파수는 공간적 해상도를 크게 나타낼 수 있게 되나, 심도에 따른 감쇠가 급격히 발생하여 투과심도는 급격히 감소하게 되고. 반대의 경우에는 공간상의 낮은 해상도를 얻게 되는 단점이 있다.

3. 현장 계측 및 결과

GPR 조사를 위해서 사용된 장비는 미국 GSSI(Geophysical Survey Systems Inc.)사의 SIR-2000 system이며, 안테나의 중심주파수는 400 MHz를 사용하였다. 그림 2의 좌측 하단에 제시한 바와 같이 2005년 8월 누수로 인해서 배수관로 교체 작업을 시행하고 있는 지점을 대상으로 현장자료 분석을 실시하였으며, 새롭게 매설되는 관로는 직경 350 mm 주철관으로 지표면에서 약 1.5 m 지점에 시공되었다. 본 대상 구간은 배수관로뿐만 아니라 송수관로가 나란하게 설치되어 있는 지점으로 상수관로 주변에는 기타 지하매설물이 없는 것으로 조사되어 GPR 결과 분석을 위해서는 최적의 조건으로 판단되었다. 현장 조사를 위해서 2006년 3월 GPR 탐사를 그림 2와 같이 상수관로의 횡단방향으로 총 8개 측선을 대상으로 실시하였다. 본 연구의 주요 목적은 상수관로의 누수 지점 탐사를 위한 것이므로 이에 앞서 지하 매설 상수관로의 GPR 탐사에 따른 이미지를 먼저 분석하여야 하며, 이를 바탕으로 누수 발생 이력이 있는 지점의 GPR 이미지 변화 양상을 분석하여야 할 것이다. 일반적으로 GPR 반사파는 상수관로 주변에서 가장 크게 나타나지만, 누수가 발생할 경우 상수관로 주변이 포화됨에 따라 토양내의 함수량 변화가 급격한 경사를 나타내어 반사파 특성이 변화되는 구간을 선정하는 것이다. GPR탐사는 단순히 반사된 신호진폭의 크기를 나타내며 이러한 식 (2) 및 (3)과 같이 반사에너지의 크기에 관계되는 것은 매설물의 유전율이 주위 지반이 갖는 유전율과의 차이에서 기인하기 된다.

측선별 GPR 탐사 결과를 제시한 그림 2를 살펴보면 약 30 ns 지점에서 강한 포물선 형태의 난반사가 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 전 측선에 대해서 일정하게 관찰되었다. 이는 매질이 건조한 사질토(유전상수 약 5 ~ 10)로 균일하다고 판단하여 매설깊이를 분석한 결과 약 1 ~ 1.5 m로 현장에서 굴착시 조사된 관로 매설 깊이와 유사한 결과로 나타났다. 이와 같은 GPR 탐사 결과를 바탕으로 상수관로의 지하 매설 위치를 파악하는 것은 먼저 대상지점의 지하매설물의 현황을 사전에 분석할 경우 매우 용이하게 적용할 수 있을 것으로 판단되며, 이를 바탕으로 누수지점을 검출할 경우 유의할만한 결과를 획득할 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 GPR 탐사는 지하 매질에 따라서 그 양상이 매우 유사하기 때문에 매질의 변화에 따른 그 특성을 찾기는 매우 복잡한 후처리 과정이 요구되고 그 신뢰성 증진을 위한 다양한 시험탐사가 필요하게 된다. 누수에 따른 매질 내의 공동 생성이나 포화도의 차이에 의한 유전율 변화 정도를 파악하기 위해서 누수가 발생한 상수관로를 굴착을 통해 실제 현장에서 다양한 방법

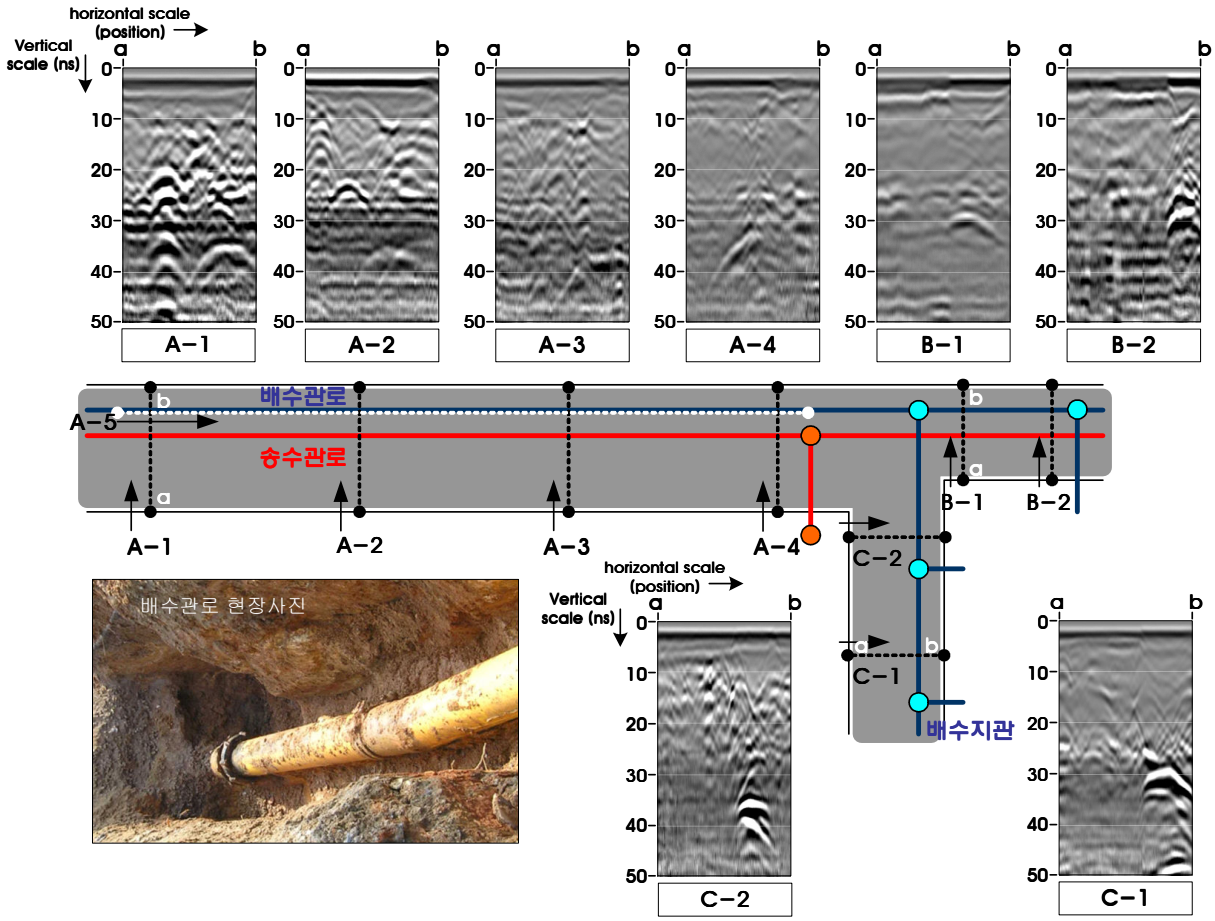

그림 2. 대상 지점 및 GPR 탐사 결과

으로 시험 탐사하여 변화성향에 대한 통계적 자료 분석을 수행하여 본 연구에서 적용한 바와 같이 GPR 조사를 실시할 경우 상수관로와 같은 라이프라인 시스템의 효율적인 관리 및 보수에 매우 유용한 방법이 될 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 관로의 일부분에서 누수가 발생하여 교체를 실시한 지점을 대상으로 GPR 탐사를 실시하였다. GPR 탐사를 위해서 관로 굴착을 실시한 지하매설물에 대한 정보를 확보하였고, 이를 활용하여 GPR 탐사 결과의 검정을 실시하였다. 이와 같은 절차를 통해서 GPR 탐사를 수행할 경우 관로 탐사를 위한 GPR 자료는 매우 유용하게 사용될 것으로 판단되며, 이를 바탕으로 누수 발생 이력이 있는 다양한 관로주변 조건을 대상으로 탐사를 실시할 경우 누수 탐사를 위한 보조적 기능을 수행할 수 있을 것이며, 상수관망시스템의 효율적인 관리 및 보수에 매우 유의한 방법이 될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Annan A.P. (1992). Ground Penetrating Radar: Workshop Notes. Sensors & Software Inc.: Mississauga, Ontario.
2. Dobson, M.C., Ulaby, F.T., Hallikainen, M.T., and El-Rayes, M.A. (1985). Microwave dielectric behaviour of wet soil-part II: dielectric mixing models. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing GE-23:35-46.
3. Ulriksen, P. (1982). Application of Impulse Radar to Civil Engineering. Department of Engineering Geology, Lund University of Technology: Lund.