

지반 이완구간 추정을 위한 지하투과레이더의 적용

Application of Ground Penetrating Radar for Estimation of Loose Layer

홍 원 택¹ Hong, Won-Taek
강 성 훈² Kang, Seonghun
이 중 섭³ Lee, Jong-Sub

Abstract

An investigation of a void and a loose layer of the ground is essential in order to prevent the losses of life and properties caused by subsidence and sinkage of the ground. Recently, studies on the ground penetrating radar survey have been actively conducted in order to estimate the void and the loose layer of the ground. However, an error can be committed by contrarily predicting a dense ground and a loose layer because the ground penetrating radar estimates an interface depth between geo-materials that have different electrical impedances. In this study, a loose ground depth is estimated using the characteristics of the reflected electromagnetic wave obtained from the ground penetrating radar survey. To gather the signals according to the loose ground depths, the ground penetrating radar survey is conducted on a field which underwent a huge ground settlement. In addition, the dynamic cone penetration test is performed to verify the result of the loose ground depth estimation from the ground penetrating radar survey. From the analysis of the reflection characteristics of the electromagnetic wave, a phase of an electromagnetic wave reflected from a denser soil layer is found to be identical with that of the first measured signal. On the other hand, a phase of an electromagnetic wave reflected from the loose soil layer is found to be opposed to that of the first detected signal. The comparison between the dynamic cone penetration index and electromagnetic signals by the ground penetrating radar shows that the estimated depth of the loose or dense layer is perfectly matched with a high reliability. The ground penetrating radar survey and the signal analysis performed in this study can be used not only for the survey of interface depth between the discontinuity layers but also for the estimation of the loose layer.

요 지

대규모 지반침하 및 지반함몰로 인한 재산, 인명피해를 사전에 예방하기 위하여 지반의 공동 및 이완구간에 대한 조사는 필수적이다. 최근, 지하투과레이더를 이용한 지반침하 및 지반함몰 구간 예측과 관련된 연구가 활발히 진행되고 있으나, 기존의 지하투과레이더 탐사에서는 전기적 임피던스가 서로 다른 층간 경계면 심도만을 산정하므로 조밀한 지반과 느슨한 지반을 서로 반대로 예측하는 오류를 범할 수 있었다. 본 연구에서는, 지하투과레이더로부터 획득된 전자기파의 반사파 특성을 이용하여 이완구간 심도를 추정하고자 하였다. 이완구간에 따른 신호획득을 위하여 과거 침하이력이 있었던 현장을 대상으로 지하투과레이더 탐사가 수행되었으며, 결과의 상호비교 및 검증을 위하여 동적

1 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정 (Member, Ph.D. Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

2 비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

3 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ., Tel: +82-2-3290-3325, Fax: +82-2-928-7656, jongsub@korea.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2016년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

큰 관입시험이 수행되었다. 전자기파의 반사특성 분석 결과, 지하투과레이더 안테나에서 처음 측정된 신호와 조밀한 지반에서 반사되어 측정된 전자기파는 동일한 위상을 보이며, 느슨한 지반에서 반사되는 경우 안테나에서 처음 측정된 신호와 반대 위상을 보이는 것으로 나타났다. 획득된 지하투과레이더 신호로부터 대상지반의 이완구간 심도 산정 및 동적 콘 관입지수와 상호비교 결과, 지하투과레이더 신호 분석으로부터 산정된 이완구간 또는 조밀한 구간의 심도는 높은 신뢰도로 산정되었다. 본 연구에서 수행된 지하투과레이더 신호획득 및 분석과정은 지반 불연속층의 심도산정뿐만 아니라 이완구간 산정에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Keywords : Discontinuity layer, Dynamic cone penetrometer, Electromagnetic wave, Ground penetrating radar, Loose layer

1. 서론

최근, 도심지 대규모 지반침하 및 지반함몰 발생건수가 연평균 20% 이상 증가함에 따라(Chung, 2015) 재산 피해 및 인명피해 또한 크게 증가하고 있다. 이러한 문제를 해결하고자, 지반침하 및 지반함몰에 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 지반침하 및 지반함몰의 원인이 되는 지하 공동 및 이완구간에 대한 조사는 상기 피해에 대한 사전 예방을 위하여 매우 중요한 가치를 지닌다(Kim and Lee, 1993; Kwon and Park, 2001).

지하 공동 및 이완구간 조사 방법으로써, 표준관입시험, 콘관입시험, 공내재하시험, 베인전단시험, 달라토미터 시험 등 원위치관입시험 방법이 이용될 수 있다. 그러나 이들 시험방법은 대상 지반을 크게 교란시키며, 많은 시간과 비용이 소모되므로 넓은 지역에 대한 조사에 용이하지 않고, 대형 관입장비가 동반되므로 도심지 조사방법으로서 적합하지 않다. 소형화된 원위치관입시험 방법인 동적 콘 관입기는 원추의 직경이 20mm로, 대상 지반을 크게 교란하지 않으며 장비의 유지보수 및 이동, 시험과정이 매우 간결하다는 장점이 있다(Mohammadi et al., 2008). 그러나, 조사 가능한 심도가 1,000mm로 매우 얇으며, 넓은 지역에 대한 탐사에 많은 시간이 필요하므로, 대단위 조사를 요하는 지하 공동 및 이완구간 조사에는 한계가 있다. 그러므로, 적은 비용과 소요시간으로 대단위 조사가 가능한 비파괴 시험법에 대한 연구가 요구된다.

비파괴 시험 방법으로서 지하투과레이더 탐사, 전기비저항탐사, 탄성파탐사가 널리 이용되고 있다. 이들 시험 방법들 중, 전기비저항탐사 방법과 탄성파탐사의 경우 전극 및 수신기가 설치되어야 하므로 도심지의 아스팔트, 콘크리트 등 포장체가 제거되어야 하며, 비교적 긴 탐사 시간과 공간을 요한다. 지하투과레이더 탐사의

경우, 포장체 제거가 선택적이며 탐사장비가 넓은 면적을 요하지 않는다. 또한, 대상지반의 조밀도는 유전상수와 관계되므로 도심지 지하 공동 및 이완구간 조사 방법으로서 적합하다.

지하투과레이더는 주로 지하 매설물 탐사, 철근콘크리트 내의 철근 품질평가 등 유전율차이가 큰 매질의 탐사 방법으로 이용되어 왔다(Kim et al., 2000). 또한, 유전율의 차이가 존재하는 토양과 기반암의 경계부 심도평가(Davis and Annan, 1989), 철도궤도 하부구조물의 도상자갈층 내 세립분 심도평가 등에도 이용되고 있다(Al-Qadi et al., 2010). 이러한 지반조사 분야의 적용에서는, 토양 하부에 기반암이 존재한다는 조건과, 도상자갈층의 표면 하부에 세립분이 존재한다는 조건을 바탕으로 수행되기 때문에 반사파의 도달시간을 이용한 경계부 심도 산정만으로 탐사를 완료할 수 있다. 그러나 지반 이완구간 탐사의 경우, 지표부분(심도 500mm 이내)에서 이완현상이 발생한 경우와, 지표부분은 단단하게 구성되어 있으나 지반 내에서 이완현상이 발생한 경우로 조건이 분류될 수 있으므로, 반사파 도달시간만을 이용하여 이완구간 산정 시 조밀구간과 이완구간을 반대로 판단하는 오류를 범할 수 있다.

본 연구에서는, 이완구간이 존재할 것으로 의심되는 지반에 대하여 지하투과레이더를 적용함으로써 지표부분에 이완구간이 존재하는 경우와 지반 내에 이완구간이 존재하는 경우의 반사파를 획득하였으며, 각각의 개소에 대하여 동적 콘 관입시험을 수행하여 결과를 상호비교 하였다. 본 논문은, 지하투과레이더 탐사와 동적 콘 관입시험에 대하여 소개하며, 지하투과레이더를 이용한 신호획득 및 파형 분석과정을 설명하였다. 또한, 분석된 지하투과레이더 신호를 이용하여 산정된 이완구간과 동적 콘 관입지수의 상호비교 결과를 분석하였다.

2. 지하투과레이더(ground penetrating radar)

지하투과레이더는 지반과 전기적 임피던스 차이가 발생하는 지하 매질물 탐사에 활용되고 있으며, 기반암 심도평가 등 지질구조 조사 분야에 널리 이용되고 있다. 특히, Al-Qadi et al.(2010)은 지반의 공극이 작을수록 유전상수가 높다는 점에 착안하여 도상자갈층 내의 세립분 함량을 평가하고자 하였다. 지하투과레이더에 사용되는 안테나는 Fig. 1과 같이 전자기파를 방사하는 송신부 안테나와 반사된 전자기파를 수신하는 수신부 안테나로 구성된다.

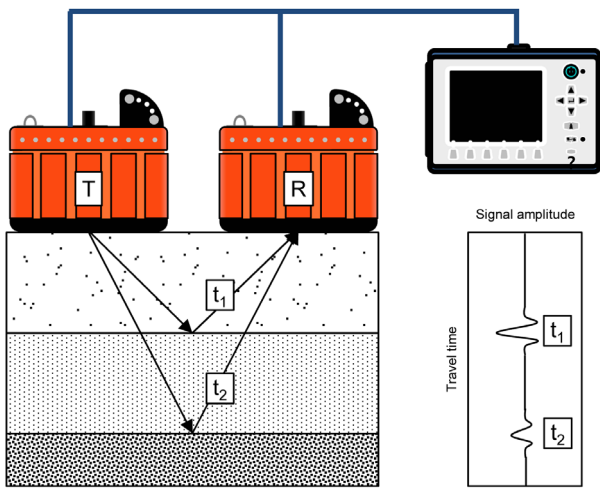


Fig. 1. Signal gathering using a ground penetrating radar. T and R denote the transmitter and the receiver, respectively

각각의 안테나에서 전자기파를 송신 및 수신하는 쌍극자는 외부에서 유입되는 전자기파의 영향을 최소화하기 위하여 윗면과 옆면이 차폐처리 된 케이스 내부의 밑면에 설치되어 있다(Rial et al., 2009). 송신부 안테나로부터 방사된 전자기파는 전기적 임피던스 차이가 발생하는 경계면에서 반사된 후 수신부 안테나로 수집되며, 수집된 신호는 시간축으로 기록된다(ASTM D6432). 송신부와 수신부 안테나가 일체형으로 구성된 안테나도 일반적으로 많이 사용되며, 본 연구에서는 일체형 안테나가 사용되었다.

시간축으로 기록된 반사파는 지반 내 전자기파의 속도를 이용하여 심도로 변환될 수 있다. 지반 내의 전자기파의 속도(v)는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

여기서, c 는 진공상태에서의 전자기파 속도($3.0 \times 10^8 \text{m/s}$)이며, ϵ_r 은 진공상태와 매질의 유전상수 비율인 상대유전상수(relative permittivity)를 나타낸다. 대표적인 매질의 유전상수는 Table 1과 같다(ASTM D6432).

Table 1. Typical relative permittivity of various materials

Material	Relative permittivity [ϵ_r]
Air	1
Fresh water	81
Sea water	70
Sand (dry)	4 - 6
Sand (saturated)	25
Silt (saturated)	10
Clay (saturated)	8 - 12
Fresh water ice	4
Permafrost	4 - 8
Granite (dry)	5
Limestone (dry)	7 - 9
Dolomite	6 - 8
Quartz	4
Coal	4 - 5
Concrete	5 - 10
Asphalt	3 - 5
Sea ice	4 - 12

전자기파의 속도(v), 파장(λ), 주파수(f)는 식 (2)와 같은 관계를 갖으므로, 지반 내 전자기파의 파장은 식 (1)과 식 (2)로부터 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v = f \times \lambda \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{c}{f \times \sqrt{\epsilon_r}} \quad (3)$$

여기서, f 는 탐사에 사용된 안테나의 전용 주파수를 나타낸다. 지하투과레이더 탐사의 해상도는 전자기파의 반파장($\lambda/2$)에 해당하므로 높은 주파수의 안테나 일수록 높은 해상도의 탐사가 가능하나 투과 심도가 얕으며, 낮은 주파수의 안테나 일수록 해상도는 다소 낮으나, 깊은 심도의 탐사가 가능하다. 사용자의 탐사 목적과 목표 심도에 따라 일반적으로 50MHz의 저주파부터 2.3GHz의 고주파 영역의 안테나가 선택된다.

3. 동적 콘 관입시험(dynamic cone penetration test)

Scala(1956)에 의하여 소개된 동적 콘 관입시험은 다짐토의 다짐상태 및 강도특성 평가를 위하여 널리 이용

되는 소형화된 원위치 관입시험 장비이다. 동적 콘 관입기는 Fig. 2와 같이 직경 20mm, 선단각 60°의 원추와 마찰저항을 최소화 하기 위하여 16mm로 축소된 관입 룯드, 해머가이드 및 해머로 구성된다.

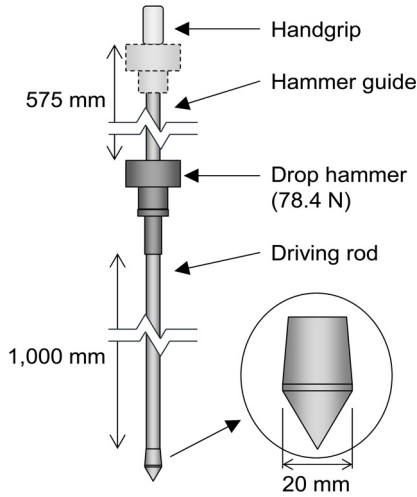


Fig. 2. Schematic drawing of dynamic cone penetrometer

동적 콘 관입기는 무게 78.4N의 해머를 낙하고 575mm로 자유낙하시켜 타격함으로써 동적관입되며, 매 타격시 콘 관입기 선단부의 강도특성을 나타내는 동적 콘 관입지수(dynamic cone penetration index, DCPI)가 획득된다. 동적 콘 관입지수는 식 (4)와 같이 타격당 관입 심도를 나타낸다(ASTM D6951).

$$DCPI_n [mm / blow] = P_n - P_{n-1} \quad (4)$$

여기서, P_n 과 P_{n-1} 은 각각 n번째와 n-1번째 해머타격시 관입된 심도를 나타낸다. 획득된 동적 콘 관입지수에 따른 대상지반의 조밀도 상태는 Table 2과 같다(Mohammadi et al., 2008).

Table 2. Suggested ground condition by DCPI

DCPI [mm/blow]	Description
> 42	Very loose
42 - 23	Loose
23 - 12	Medium
12 - 5	Dense
< 5	Very dense

4. 적용현장 및 실험과정

이완구간에 따른 지하투과레이더 신호 특성 분석을 위하여 경기도에 위치한 현장이 선택되었다. 대상현장

은 자동차 도로와 인접한 인도로서, 과거 지반침하이력 이 있었으며, 추가 침하가 의심되는 구간이다. 해당 현장에서 수행된 시추공시험 및 시료채취 결과, 보도블록 하부의 대상지반을 조성하는 재료는 통일분류법에 의하여 실트질모래(SM) 이었으며, 지하수위는 지표면으로부터 심도 약 6m에 위치하는 것으로 나타났다.

지반 이완특성에 따른 결과의 비교분석을 위하여 해당지반의 2개소에서 보도블록을 제거한 후, 지하투과레이더 탐사가 수행되었다. 탐사 당시, 현장에서 확인된 각각의 반사파 위상은 서로 상이하였으며, 첫 번째 개소는 지표부분이 느슨할 것으로(loose to dense), 두 번째 개소는 지반 내에 느슨한 구간이 존재할 것으로(dense to loose) 예상되는 바, 각각의 개소를 LTD 및 DTL로 명명하였다. 지하투과레이더 탐사에 이용된 안테나는 전용주파수 400MHz이며, 목표심도 약 2m 탐사를 위한 신호가 수집되었다. 또한, 지하투과레이더 탐사로부터 획득된 신호와 상호비교하기 위하여 각각의 개소에서 관입룯드가 2m로 확장된 동적 콘 관입시험이 수행되었다. 이는, ASTM D6951에 명시된 관입룯드의 길이(1m)의 두 배에 해당하여, 해머로부터 선단부까지 전달된 에너지가 표준 동적 콘 관입시험과 상이하므로, 대상지반의 정확한 다짐도 및 강도특성 평가에는 한계가 있다. 그러므로, 본 연구에서 획득된 동적 콘 관입지수(DCPI)는 심도에 따른 상대적인 이완상태 획득에 이용되었다.

5. 실험결과

5.1 획득신호

LTD와 DTL에서 획득된 신호를 각각 Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)에 나타내었다. 지하투과레이더는 반사된 전자기파를 시간 단위로 기록하며, 설정된 기록시간 동안 512개의 데이터포인트를 획득하므로 기록시간 설정은 원하는 탐사심도 내의 해상도를 결정하는 중요한 요소이다. 본 연구에서는 목표심도를 2m로 하고자, 기록시간을 40ns로 설정하였다. 또한, 현장에서 발생하는 비주기적 잡음을 제거하기 위하여 연속 25회 측정 후 평균하였다.

LTD와 DTL의 약 4ns에서 높은 진폭의 신호가 획득되었으며, LTD의 약 22ns와 DTL의 약 18ns에서 높은 진폭의 신호가 획득되었다. LTD와 DTL의 4ns에서 획득된 신호는 안테나 내부의 쌍극자와 안테나의 밑면에서 반사된 전자기파 및 지표면과 안테나 사이에서 반사

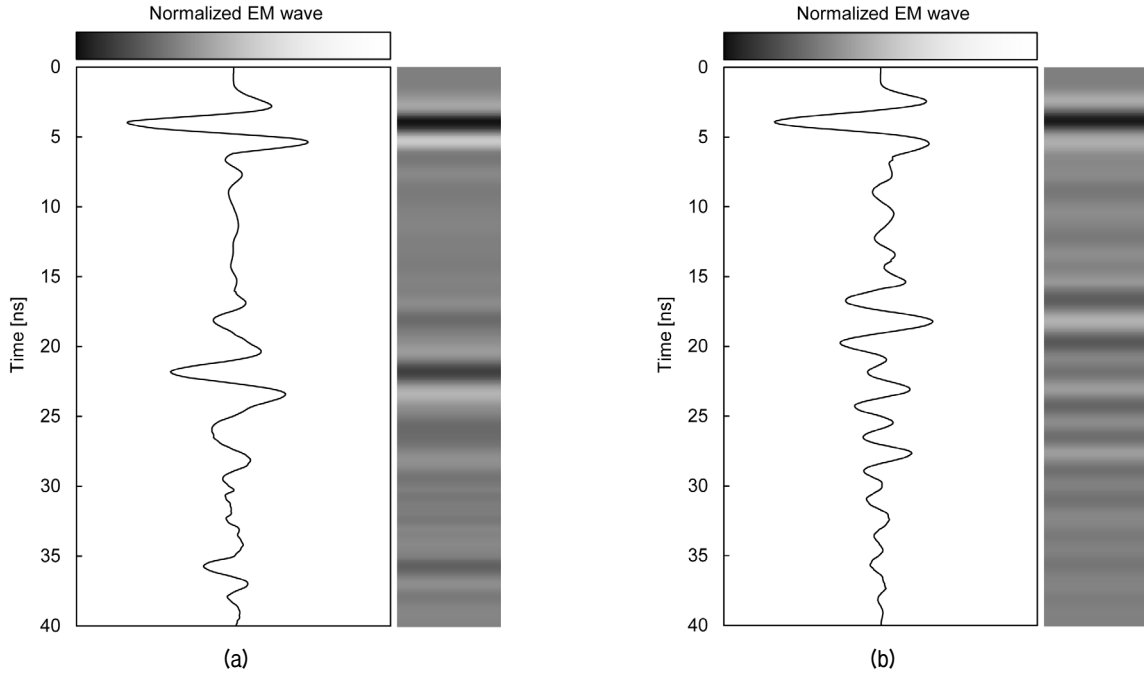


Fig. 3. Gathered signals from the GPR survey: (a) LTD; (b) DTL. EM wave denotes electromagnetic wave gathered by a GPR

된 전자기파가 중첩된 신호이며(Rial et al., 2009), LTD의 약 22ns와 DTL의 약 18ns에서의 신호는 전기적 임피던스 차이가 큰 지반의 불연속면에서 반사되었을 것으로 추정되는 결과이다.

5.2 신호분석

지반 불연속면의 심도 산정을 위하여 지반의 유전상수 산정이 요구되는 바, 해당 현장 인근의 심도 900mm에 설치되어 있는 지역상수도 상부지반에 대하여 모의 탐사를 수행하였다. 모의 탐사로부터 획득된 반사파의 전파거리와 전파시간 및 식 (1)을 이용하여 역산한 결과, 전자기파의 속도는 약 1.2×10^8 m/s로 계산되었으며, 상대유전상수는 6.25로 산정되어 건조한 모래의 상대유전상수와 유사한 값을 나타내었다(Table 1). 모의탐사로부터 획득된 대상지반의 유전상수 및 전자기파 속도를 Fig. 3의 시간축에 적용하여 Fig. 4와 같이 전파거리로 보정하였다. 보정된 전파거리(좌측 종축)는 전자기파가 방사된 후 반사되어 수집되기까지의 왕복거리(전파거리)를 나타내므로 편도거리인 실제 심도로 보정하여 우측 종축에 나타내었다. 또한, Fig. 3의 약 4ns에서 반사파는 쌍극자와 안테나의 밑면 및 지표면과 안테나 사이에서 반사된 전자기파가 중첩된 것이므로 이에 해당하는 심도를 0mm로 적용하였다.

심도보정 결과, LTD와 DTL 각각의 심도 1,050mm,

880mm에서 반사파가 감지되었으나, 위상은 서로 반대로 나타났다. 이는 반사를 야기한 불연속면의 유전상수가 반사 이전 지반의 유전상수보다 상대적으로 높고 낮은의 결과인 것으로 판단되었다.

대상 지반은 비강자성(non-ferromagnetic) 매질로 분류되며, 비강자성 매질의 전자기적 임피던스(z^*)는 식 (5)와 같이 매질의 상대유전상수(ϵ_r)와 반비례 관계를 갖는다.

$$z^* \propto \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (5)$$

또한, 전자기파가 전자기적 임피던스가 z_1^* 인 매질에서 z_2^* 인 매질로 진행할 때, 반사계수(R^*)는 식 (6)과 같이 표현된다.

$$R^* = \frac{z_2^* - z_1^*}{z_2^* + z_1^*} \quad (6)$$

여기서, 반사계수가 양의 값을 갖는 경우($z_1^* < z_2^*$), 반사파의 위상은 방사된 전자기파와 동일한 위상을 보이나, 반사계수가 음의 값을 갖는 경우($z_1^* > z_2^*$), 반사파는 반대의 위상을 보인다(Santamarina et al., 2001). 공기의 상대유전상수가 1이고 건조한 지반의 경우 4~6의 값을 나타내며, 불포화토 지반의 경우 20 이하의 값을 나타내고, 복합체의 경우 부피비로 상대유전율이 결정된다. 따라

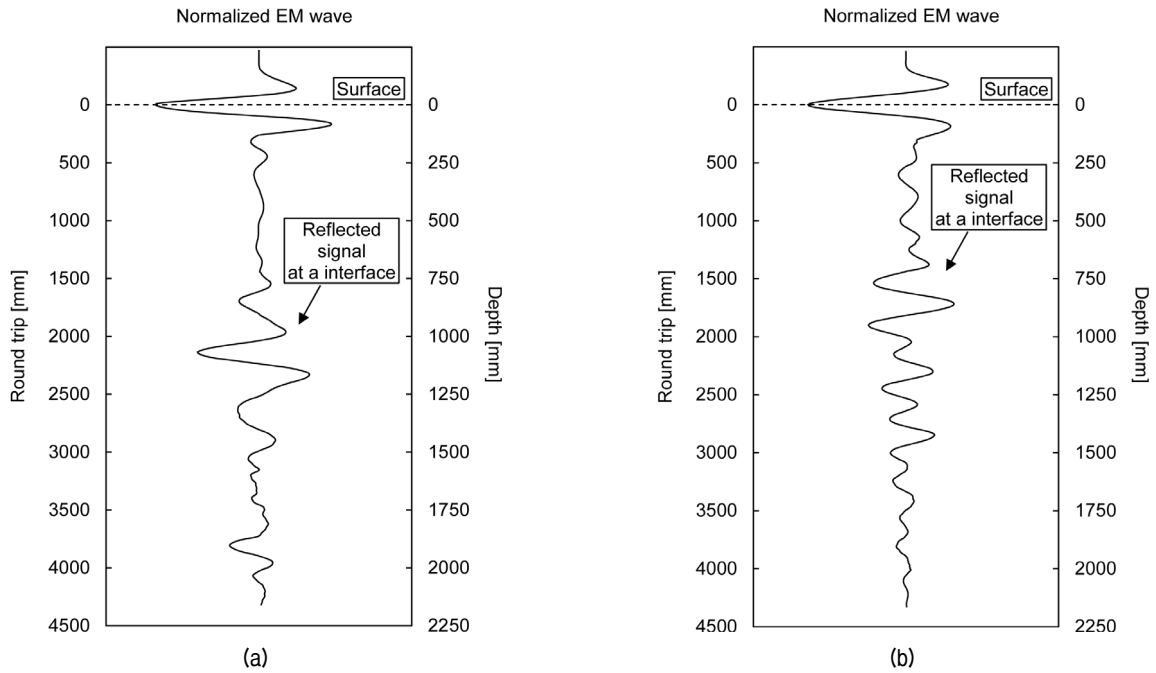


Fig. 4. Processed signals: (a) LTD; (b) DTL. EM wave denotes electromagnetic wave gathered by a GPR

서, 느슨한 지반일수록 간극 내에 흙 입자보다 상대유전 상수가 낮은 공기를 많이 포함할 수 있으므로 복합상대 유전상수가 작아지며 이에 따라 반사계수는 커지게 된다. 그러므로, 느슨한 지반에서 반사된 반사파($R^* > 0$)의 위상은 방사된 전자기파와 동일한 위상을 보이며, 조밀한 지반에서 반사된 반사파($R^* < 0$)의 위상은 방사된 전자기파와 반대의 위상을 보인다. Rial et al.(2009)과 GSSI(2005)는 반사된 전자기파의 위상이 첫 번째로 나타난 신호를 기준으로 하여 동일한 위상일 경우 높은 전자기적 임피던스($R^* < 0$)를 갖는 매질에서 반사된 것이며, 반대의 위상을 보이는 경우 낮은 전자기적 임피던스($R^* > 0$)를 갖는 매질에서 반사된 것이라고 보고하였다. 이와 같은 이유는 첫 번째 신호가 방사된 전자기파가 아닌 쌍극자와 안테나 사이에서 반사된 전자기파이므로, 방사된 전자기파와 반대의 위상을 갖는 반사파이기 때문이다. 따라서, 첫 번째 신호와 위상이 동일하면 더 조밀한 지반에서 반사된 경우이며, 첫 번째 신호와 반대 위상인 경우, 더 느슨한 지반에서 반사된 경우로 볼 수 있다.

본 연구에서 사용된 지하투과레이더 안테나의 전용주파수는 400MHz이며, 매질 내 전자기파의 속도는 1.2×10^8 m/s이므로, 파장은 약 300mm로 계산된다. Fig. 4(a)에서, 파장이 약 300mm인 반사파는 전파거리 약 2,100mm에서 획득되었으며, 첫 번째로 수집된 신호(0mm)의 위상과 동일하다. 그러므로, 전파거리를 실제 심도로 보정할 때, LTD의 1,050mm 하부 지반은 상부의 지반보다 단단할

것으로 판단되며, 이완구간의 두께는 지표면으로부터 1,050mm까지로 판단된다. Fig. 4(b)의 경우, 파장이 약 300mm인 반사파는 전파거리 약 1,760mm에서 획득되었으며, 획득된 반사파는 첫 번째로 획득된 신호(0mm)와 반대의 위상을 보이므로, DTL의 심도 880mm 하부 지반은 상부에 비하여 느슨할 것으로 판단된다. 그러나, 경계심도(880mm)와 탐사 최대심도(2,000mm) 사이에서 첫 번째로 획득된 신호와 동일한 위상의 반사파가 수집되지 않았으므로, DTL의 이완구간은 본 연구에서 수행된 탐사심도보다 더욱 깊은 심도까지 분포하며, 이완구간의 두께는 1,120mm 이상일 것으로 판단된다.

5.3 동적 콘 관입지수

지하투과레이더 탐사로부터 획득된 이완구간 검증을 위하여 LTD와 DTL에 각각 동적 콘 관입시험을 수행하였다. 표준 동적 콘 관입시험의 관입로트드 길이는 1,000mm인 반면, 지하투과레이더 탐사는 심도 2,000mm까지 수행되었으므로 관입로트드를 2,000mm로 연장함으로써 지하투과레이더 탐사심도에 해당하는 깊이에 대하여 동적 콘 관입지수를 획득할 수 있도록 하였다.

Fig. 5는 LTD에서 획득된 지하투과레이더 신호 및 동적 콘 관입지수 주상도를 보여준다. 동적 콘 관입지수는 관입초반 급격히 상승하여 42mm/blow 이상의 매우 느슨한 상태를 나타내었으나, 심도 약 1,050mm에서는 약

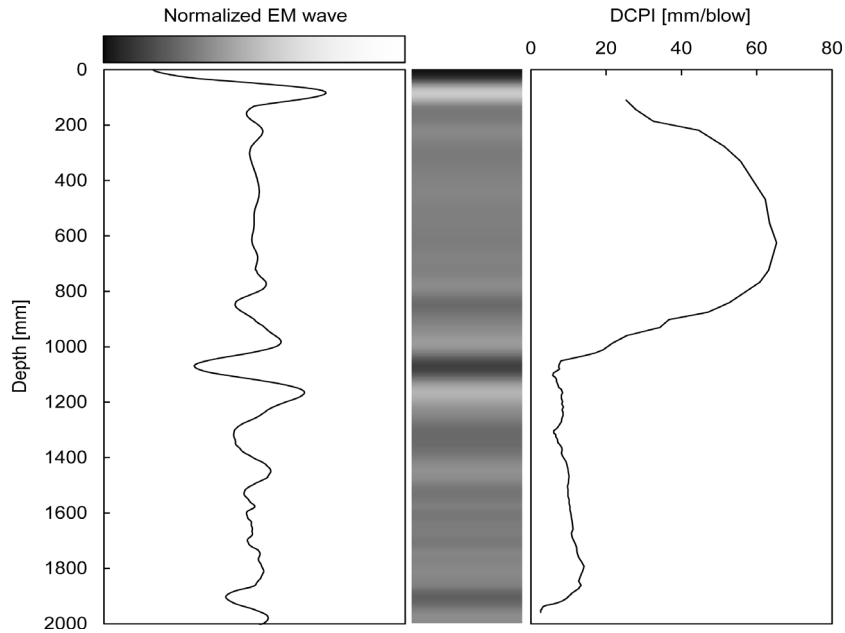


Fig. 5. Comparison between the results of GPR survey and DCP test (LTD)

7mm/blow로 감소하여 조밀한 상태의 특성을 나타내었다(Table 2). 이후 심도에서는 동적 콘 관입지수가 약 13mm/blow까지 서서히 증가하는 경향을 보였으나, 심도 약 1,950mm에서 약 2mm/blow로 급격히 감소하여 매우 조밀한 상태를 나타내었다. 이러한 특성은 지하투과레이더 신호에서도 획득되었다. 심도 1,950mm(전파 거리: 3,900mm)에 대한 반사파는 전파거리로 인한 에너지손실이 발생하여 심도 1,050mm에서 획득된 반사파 보다 작은 진폭을 보이지만 동일한 위상을 나타낸다.

Fig. 6은 DTL에서 획득된 지하투과레이더 신호 및 동적 콘 관입지수를 보여준다. 동적 콘 관입지수는 지표면으로부터 심도 약 300mm까지 서서히 감소하였으며, 심도 약 850mm까지 7~15mm/blow의 값을 나타내었으나, 이후 심도에서는 급격히 증가하여 약 40mm/blow의 느슨한 상태를 나타내었다. DTL에서 지하투과레이더 및 동적 콘 관입시험으로부터 획득한 이완구간의 심도는 약 30mm의 오차를 보였다. 이는 본 연구에서 사용된 지하투과레이더 안테나의 해상도($\lambda/8$) 영향인 것으로 판단된다.

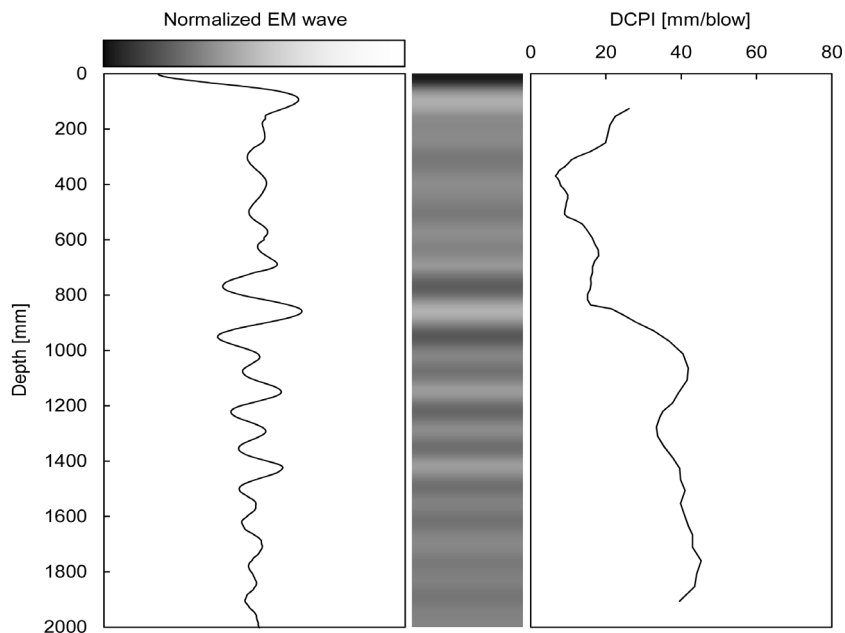


Fig. 6. Comparison between the results of GPR survey and DCP test (DTL)

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 지하투과레이더 탐사로부터 획득한 전자기파의 반사파 특성을 이용하여 지반의 이완구간 심도를 산정하고자 하였다. 지반 이완구간에서의 지하투과레이더 신호 획득을 위한 탐사대상으로서 경기도 소재의 현장이 선택되었다. 해당 현장은 과거 침하이력이 있었으며, 현재에도 잔류 이완구간이 존재할 것으로 판단되는 구간이다. 실험 결과의 신뢰도를 상승시키고자, 대상현장의 2개소(LTD, DTL)에서 지하투과레이더 탐사가 수행되었으며, 결과의 상호비교 및 검증을 위하여 동적 콘 관입시험이 수행되었다. 획득된 지하투과레이더 신호는 시간축으로 기록되므로 해당 지반의 유전율을 이용하여 심도로 보정하였다.

조밀한 지반(LTD)에서 획득된 반사파 신호는 심도 약 1,050mm에서 수집되었으며, 획득된 반사파의 위상은 지하투과레이더 안테나에서 처음으로 측정된 신호와 동일한 위상을 나타내었다. 느슨한 지반(DTL)에서 획득된 반사파 신호는 전파거리 약 880mm에서 수집되었으며, 획득된 반사파의 위상은 지하투과레이더 안테나에서 처음으로 측정된 신호와 반대 위상을 나타내었다. 해당 현장에서 수행된 동적 콘 관입시험으로부터 산정한 동적 콘 관입지수는 LTD에서 심도 1,050mm를 경계로 하부지반이 더 조밀한 지반임을 나타내었으며 DTL에서는 심도 850mm를 경계로 하부지반이 더 느슨한 상태를 나타내었다. 즉, 동적 콘 관입지수로부터 산정한 지층 상태변화와 지하투과레이더의 위상변화로 추정된 지층 상태변화가 일치함을 알 수 있었다.

본 연구에서 수행된 지하투과레이더 탐사 및 신호분석 과정은 전기적 임피던스가 상이한 지반의 경계면 심도 획득뿐만 아니라 상대적인 이완구간 산정에 활용될 수 있으므로, 사전 지반보강을 위한 지반조사에 활용될 수 있을 것이라 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2011-0018110)을 밝히며, 이에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

1. Al-Qadi, I. L., Xie, W., and Roberts, R. (2010), "Optimization of Antenna Configuration in Multiple-Frequency Ground Penetrating Radar System for Railroad Substructure Assessment", *NDT&E International*, Elsevier, 43, pp.20-28.
2. Al-Qadi, I. L., Xie, W., Roberts, R., and Leng, Z. (2010), "Data Analysis Techniques for GPR Used for Assessing Railroad Ballast in High Radio-frequency Environment", *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, 136(4), 392-399.
3. ASTM D6432-11 (2011), "Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation", Annual Book of ASTM Standard 04.09, ASTM International, West Conshohocken, PA.
4. ASTM D6951 (2009), "Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications", Annual Book of ASTM Standard 04.03, ASTM International, West Conshohocken, PA.
5. Chung, C. K. (2015), "Sinkhole, does the Ground of the City is Crumbling? (environment day special issue)", *Water Journal*, 131, pp.51-63.
6. Davis, J. L. and Annan, A. P. (1989), "Ground-penetrating Radar for High-resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy", *Geophysical Prospecting*, 37(5), pp.531-551.
7. Geophysical Survey Systems, Inc. (2005), "GSSI Handbook for RADAR Inspection of Concrete", GSSI, 38.
8. Kim, Y. J., Lee, S. S., Ahn, B. Y., and Kim, Y. G. (2000), "Examination on the Influence of Depth, Size and Interval of Rebar on the Signal of Ground Penetrating Radar", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, 4(2), pp.167-174.
9. Kim, Y. S. and Lee, C. (1993), "Probabilistic Study of Surface Subsidence due to the Collapse of Underground Void during Earthquakes", *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, 13(4), pp.217-226.
10. Kwon, K. S. and Park Y. J. (2001), "Stability Assessment of Building Foundation over Abandoned Mines", *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, 11(2), pp.174-181.
11. Mohammadi, S. D., Nikoudel, M. R., Rahimi, H., and Khamehchiyan, M. (2008), "Application of the Dynamic Cone Penetrometer (DCP) for Determination of the Engineering Parameters of Sandy Soils", *Engineering Geology*, Elsevier, 101(3), 195-203.
12. Rial, F. I., Lorenzo, H., Pereira, M., and Armesto, J. (2009), "Waveform Analysis of UWB GPR Antennas", *Sensors*, 9(3), 1454-1470.
13. Santamarina, J. C., Klein, K. A., and Fam, M. A. (2001), "Soils and Waves-Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring", John Wiley and Sons, NY, 448.
14. Scala, A. J. (1956), "Simple Methods of Flexible Pavement Design Using Cone Penetrometers", *New Zealand Engineering*, 11(2), 34.

Received : September 22nd, 2015

Revised : October 5th, 2015

Accepted : November 10th, 2015