

# 도로동공 탐지를 위한 지표투과레이더의 신호패턴에 관한 연구

## Signal Pattern Analysis of Ground Penetrating Radar for Detecting Road Cavities

윤진성 Yoon, Jin-Sung  
백종은 Baek, Jongeun  
최연우 Choi, Yeon Woo  
최현 Choi, Hyeon  
이창민 Lee, Chang Min

정희원 · 서울특별시 품질시험소 도로포장연구센터 주무관 (E-mail : jsyoon94@seoul.go.kr)  
정희원 · 서울특별시 품질시험소 도로포장연구센터 센터장 · 교신저자 (E-mail : jbaek@seoul.go.kr)  
서울특별시 안전총괄본부 도로관리과 도로관리팀 팀장 (E-mail : cywem@seoul.go.kr)  
서울특별시 안전총괄본부 도로관리과 도로관리팀 주무관 (E-mail : chtry@seoul.go.kr)  
정희원 · 서울특별시 품질시험소 도로포장연구센터 주무관 (E-mail : min7872@seoul.go.kr)

### ABSTRACT

**OBJECTIVES :** The objective of this study is to detect road cavities using multi-channel 3D ground penetrating radar (GPR) tests owned by the Seoul Metropolitan Government.

**METHODS :** Ground-penetrating radar tests were conducted on 204 road-cavity test sections, and the GPR signal patterns were analyzed to classify signal shape, amplitude, and phase change.

**RESULTS :** The shapes of the GPR signals of road-cavity sections were circular or ellipsoidal in the plane image of the 3D GPR results. However, in the longitudinal or transverse direction, the signals showed mostly unsymmetrical (or symmetrical in some cases) parabolic shapes. The amplitude of the GPR signals reflected from road cavities was stronger than that from other media. No particular pattern of the amplitude was found because of nonuniform medium and utilities nearby. In many cases where road cavities extended to the bottom of the asphalt concrete layer, the signal phase was reversed. However, no reversed signal was found in subbase, subgrade, or deeper locations.

**CONCLUSIONS :** For detecting road cavities, the results of the GPR signal-pattern analysis can be applied. In general, GPR signals on road cavity-sections had unsymmetrical hyperbolic shape, relatively stronger amplitude, and reversed phase. Owing to the uncertainties of underground materials, utilities, and road cavities, GPR signal interpretation was difficult. To perform quantitative analysis for road cavity detection, additional GPR tests and signal pattern analysis need to be conducted.

### Keywords

Ground Penetrating Radar, Road Cavity, Pavement, Signal pattern

Corresponding Author : Baek, Jongeun  
The Pavement Research Center, Quality Inspection Office Division,  
Seoul Metropolitan Government, 131, Taebong-ro, Seocho-gu,  
Seoul, 06763, Korea  
Tel : +82.2.3462.6718 Fax : +82.2.3462.6710  
E-mail : jbaek@seoul.go.kr

International Journal of Highway Engineering  
<http://www.ksre.or.kr/>  
ISSN 1738-7159 (print)  
ISSN 2287-3678 (Online)  
Received Sep. 19, 2016 Revised Nov. 30, 2016 Accepted Nov. 30, 2016

## 1. 서론

최근 국내에서는 도로의 일부가 급속도로 침하 또는 함몰되어 차량이 빠지거나 보행자가 추락하는 등의 사고를 발생시키는 현상이 사회적으로 큰 문제로 대두되고 있다. 이러한 현상이 지속적으로 발생하고, 언론에서

대대적으로 보도함에 따라 국민 불안이 커지면서 사회적 이슈로 대두되어 이에 대한 대책 마련이 필요한 실정이다. 이에 서울시에서는 도로함몰 예방을 위하여 2014년 8월 도로함몰 특별관리대책을 마련하였다. 이 대책의 일환으로 도로함몰을 사전에 예방하기 위하여 도로

하부에 존재하는 동공을 탐지하는 기술개발을 위한 장비 도입과 민간용역을 병행하고 있으며, 자체탐사는 2015년 7월부터 수행하고 있다.

일반적으로 도심지에서의 도로하부 동공탐사는 지표 투과레이더(Ground Penetrating Radar, GPR)를 이용하는 비파괴시험(Non-Destructive Test)으로 조사한다(Baek et al., 2014). 그러나 2015년부터 수행한 동공탐지·분석 적중률은 약 20% 수준으로 정확도가 낮은 수준이다. 이러한 이유로 GPR 조사장비의 기능 문제보다는 학문적 지식과 경험에 근거한 정성적인 분석 방법의 문제로 추정된다. 따라서 보다 신뢰성 있는 탐지·분석기술 향상을 위해서는 많은 양의 동공 데이터 취득과 분석경험을 통해 정량적 해석에 근거한 분석기술 향상이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 서울시 도로에서 획득한 GPR 데이터 신호패턴을 구분하여 동공 여부를 판정하고, 다양한 신호패턴을 원인별로 분류함으로써 정확한 동공탐지를 위한 근거자료로 활용하고자 하였다.

## 2. GPR 기본 이론

### 2.1. GPR 탐사 원리 및 특징

GPR은 수MHz에서 수GHz 범위의 전자기파를 지표와 접한 송신안테나를 통해 Fig. 1과 같이 주매질 내부로 방사시키고, 주매질 내부의 이상체(지층경계, 매질물, 동공 등)에 부딪혀 반사되는 전파 분석을 통해 지층내부를 탐사하는 비파괴 조사방법이다. 물리탐사법에 빠른 조사 시간과 정밀도가 높아서 현재 도로하부 동공탐사 분야에 적극적으로 활용되고 있다. GPR 장비에서 방사되는 전자파가 지면을 투과하는 과정에서 손실이 크기 때문에 지표투과레이더는 일반적인 레이더에

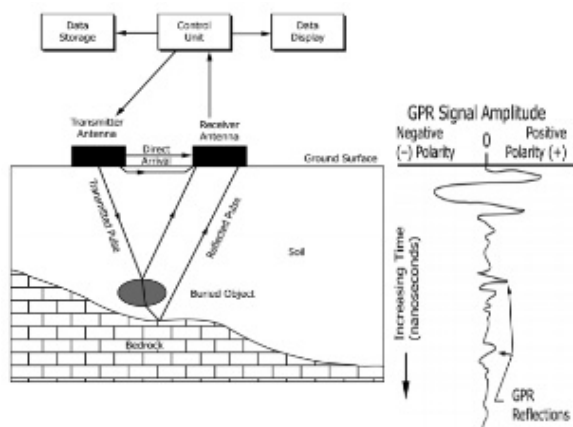


Fig. 1 Schematics of GPR System and Trace (ASTM D6432-11, 2011)

비해 탐지 거리가 짧은 경향이 있고, 측정 시 외부 방해요인을 제거해야 정확한 값을 얻을 수 있다.

도심지 포장도로에서 GPR은 포장체의 각 층별 두께 및 동공 존재 여부를 확인하는데 활용될 수 있다. Fig. 2와 같이 GPR 결과화면 중 파형(waveform)을 보면, 각 층별 매질이 바뀔 때 진폭의 크기가 변하며, 유전상수가 작은 매질이 하부에 있을 경우 위상(진폭방향)이 역전되어 나타나기도 한다(Al-Qadi et al., 2013, Conyers, 2015). 예를 들어 콘크리트 내부에 빈 공간(void)이 존재하는 경우 위상(+)방향에서 (-)방향으로 역전되는 현상이 나타난다(Duan et al., 2011).

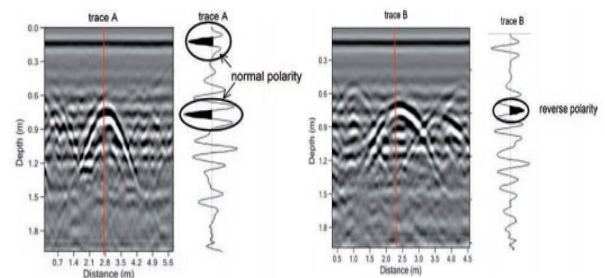


Fig. 2 GPR Data and Reflection Trace (Conyers, 2015)

이동식 GPR 시험 결과를 시간(또는 거리)에 따라서 연속적으로 나타내면(일명 B-scan) 지하에 지장물이 있을 시 포물선 형태로 표현된다. 이는 Fig. 3과 같이 GPR 신호가 측정점에서부터 지장물까지 도달시간의 차이가 위치에 따라 달라지기 때문이다. 이러한 포물선은 유전율이 낮은 물질일수록 기울기가 완만하고, 유전율이 높을수록 급한 형태로 나타난다(Kong et al., 2012).

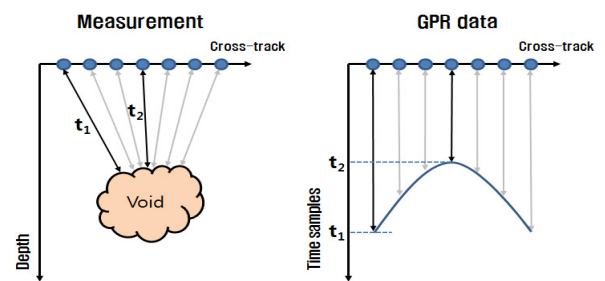


Fig. 3 Parabolic Signature in the GPR Data (Kong et al., 2012)

## 3. 동공탐사 시험

### 3.1. 개요

서울시에서는 서울시 주요도로를 대상으로 2014년부터

동공탐사를 실시하고 있다. 본 연구에서는 이 중 동공이 확인된 204개 지점에서 자체 탐사장비를 이용하여 획득한 GPR 데이터를 기초로 GPR 신호분석을 실시하였다.

### 3.2. 탐사방법

도로동공 탐사는 2단계로 실시하였다. 1차 탐사는 차량형 3D GPR장비로 지중의 데이터를 획득하고, 획득한 GPR 신호를 분석하여 동공, 매설물, 지층경계 등을 추정하는 것이다. 여러 이상신호 중에서 1차 탐사에서는 동공으로 추정되는 지점을 선정한다. 2차 조사는 분석동공 지점을 핸드 GPR장비로 최종 천공지점을 확정하고 천공을 실시하여 동공을 확인하는 것이다. 동공이 확인되면 시추공을 통해 영상촬영기로 포장단면, 동공단면, 심도 등을 촬영한다(Fig. 4).

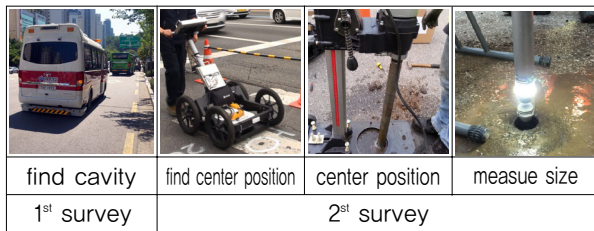


Fig. 4 Method of Road Cavity Investigation

이러한 과정을 통해 동공을 발견하면 동공조사서를 작성하고 도로관리청에 통보하여 함몰사고 발생 전에 안전조치나 관리가 이루어지도록 한다. 그리고 세부적인 원인 분석 후 결과보고서를 작성하고, 동공 데이터를 업데이트 한다(Fig. 5).

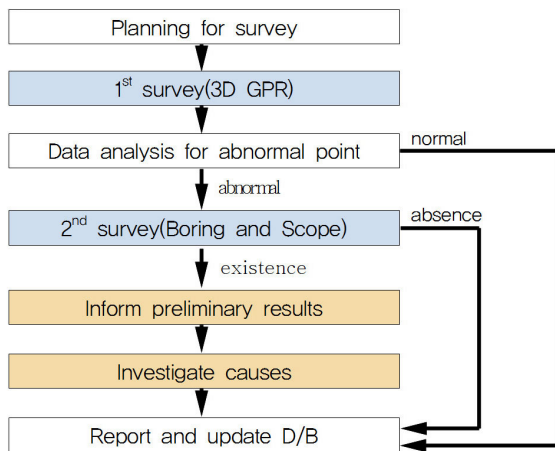


Fig. 5 Flow Chart of Road Vavity Investigation

### 3.3. 탐사장비

서울시에서 운영하는 동공탐사장비는 차량형 3D GPR,

핸드 GPR, 천공기, 영상촬영기로 구성되어 있다. 차량형 GPR 장비는 다채널 GPR 송수신안테나, 노면 및 주변(전, 후, 좌, 우)영상 카메라, 거리측정기, GPS로 구성되며, 차량에 탑재되어 서로 연동하여 운용할 수 있게 되어 있다. GPR 안테나는 Impluse 방식의 노면접지형(Ground-coupled)이고 중심주파수는 500MHz로 포장하부와 대다수 매설물이 존재하는 심도인 1.5m 이내를 정밀하게 탐사할 수 있도록 설계되었다. 도심지에서 GPS만으로 위치를 측정할 경우 고층건물, 터널 등으로 인한 거리오차가 발생할 확률이 높은 것으로 나타났다. 따라서 서울시는 노면 및 주변영상 카메라와 GPR 신호를 일치시키고, 거리측정기 및 GPS까지 연동되도록 하여 정확한 위치측정이 가능하고 상호 검증이 가능하도록 하였다.

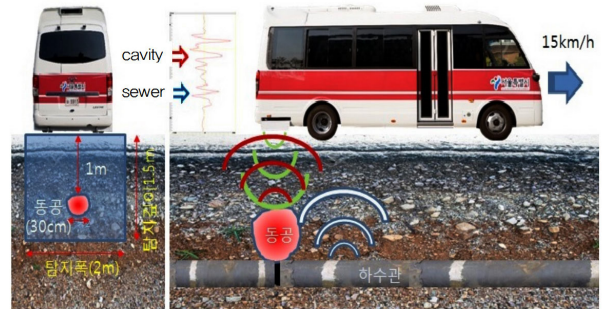


Fig. 6 Seoul City 3D GPR Survey Vehicle

현재까지는 GPR 탐사와 분석만으로 동공의 존재를 확정하기에는 어려우므로 동공으로 추정되는 지점을 천공하여 2차 조사를 실시한다. 휴대성이 우수한 50mm 직경의 천공기로 동공이 위치한 상단까지 천공하고 내시경 또는 영상촬영기로 시추공 내부를 360° 방향으로 연속촬영한 단면영상을 통해 포장층 단면, 동공의 두께, 심도 등을 확인하였다.

### 3.4. 탐사결과

동공탐사·분석·조사를 통해 발견한 동공의 대부분이 상단 토피가 0.6m 이내에 존재하는 것으로 조사되었

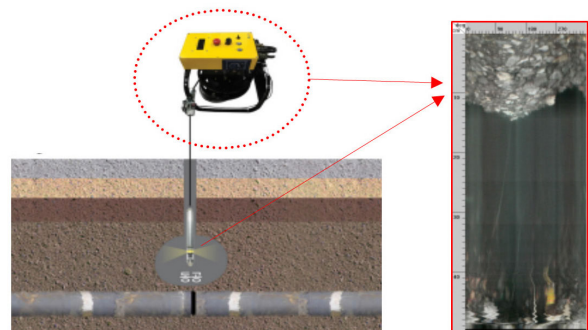


Fig. 7 Portable Boring and Borehole Imaging system

다. Fig. 7에 나타난 것과 같이 동공 상단 토피는 0.2m 이내 15.2%, 0.2~0.4m에서 66.2%, 0.4~0.6m에서 15.7%로 상단 토피 0.6m 이내에 동공이 존재하는 것이 97.1%로 나타났다. 포장층 하부 기준으로는 0.2m 이내에 존재하는 동공이 89.7%였다. 이는 GPR 장비의 적탐사 심도가 1.5m 정도까지 탐사할 수 있는 특성이기도 하지만 실질적으로 포장층 직하부까지 발전된 동공이 많이 존재하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 포장층(아스팔트콘크리트)과 같이 균질한 매질과 접한 부분까지 도달한 동공을 분석해 내는 것이 비교적 용이하고, 상대적으로 불균질한 매질인 보조기층(혼합골재) 내에 존재하는 동공을 분석해 내는 것이 어려움이 많기 때문에 얇은 심도에서 동공이 많이 발견되는 요인이기도 하였다.

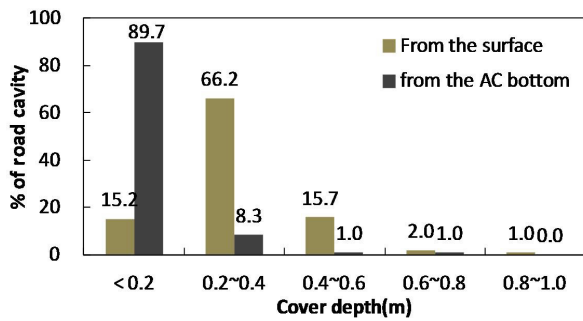


Fig. 8 Cover Depth Distribution of Road Cavity

#### 4. GPR 신호 분석

일반적으로 포장층에서 동공 존재여부는 반사파의 신호모양, 신호세기, 위상변화에 의해 파악할 수 있다. 대다수의 동공은 구의 형태를 취하기 때문에 반사파가 포물선 형태의 신호모양으로 나타난다. 아스팔트콘크리트의 유전율은 4~6 사이인데, 동공(공기)의 유전율은 1에 가깝기 때문에 이러한 급격한 유전율의 차이로 인하여 신호세기가 동일 심도의 주변 신호에 대비하여 크게 나타난다. 또한 일정 크기 이상의 동공의 경우 Fig. 9와 같이 동공 상부에서 반사된 GPR 신호에서 위상이 (+)

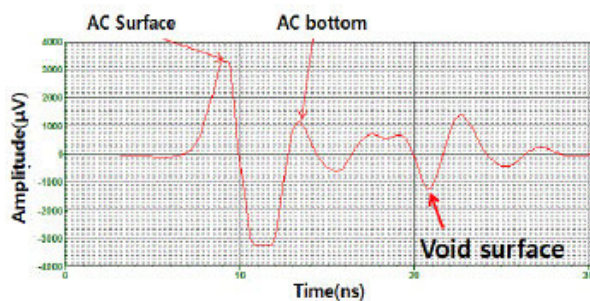


Fig. 9 A-scan Signal Data from Void Under Road (Kim et al., 2016)

에서 (-)로 바뀌게 된다(Kim et al., 2016).

본 연구에서는 동공으로 확인된 204개소에 대하여 GPR 장비로 데이터를 획득하여, 동공에서의 신호형태, 신호세기 및 위상변화 등을 상기 분석법의 적용성과 향후 보완사항을 파악하고자 하였다.

#### 4.1. GPR 신호형태

동공에서의 GPR 신호형태는 종방향(차량진행방향) 및 횡방향(차량진행 직각방향) 모두 포물선, 한 방향만 포물선, 불규칙한 모양 등으로 다양하게 나타났다. 이 중에서 양 방향 포물선으로 나타난 경우가 58%, 한 방향에서만 포물선으로 나타난 경우가 35%로 포물선 형태로 나타난 경우가 전체의 92%를 차지했다. 이밖에 불규칙한 형태로 나타난 경우가 6%로 나타났다.

여기서 주목할 점은 좌우가 대칭되는 포물선 형태가 아닌 찌그러진 모양의 포물선 형태로 나타났다( Fig. 10). 또한 한 방향만 포물선 형태로 나타나는 경우에는 매설물 신호와 유사하므로 주변 신호를 확인하여 매설물 유무를 확인하여야 동공 신호를 구분할 수 있다. 매설물 신호는 매설물과 직교되는 방향에서 포물선 형태로 나타나고 매설물 진행 방향에서 직선형태가 나타난다. 하지만 탐사진행 사선방향으로 매설물이 존재하는 경우에는 종·횡 양방향에서 찌그러진 포물선 모양이 나타날 가능성이 높다. 이 경우에는 GPR 평면영상으로 매설물 여부를 파악할 수 있다. 매설물의 경우, 연속적인 직선 형태로 나타난다. 평면영상에서 길게 형성된 동공을 제외하고 대다수의 동공은 부분적으로 타원형태가 나타난다. 따라서 평면영상에서 부분적인 타원형태가 나타나고 종·횡단면에서 찌그러진 포물선 모양이 나타나면 동공이 존재할 가능성이 높다. 보다 신뢰성 높은 분석을 위해서 측정방향별 신호 형상을 정량화할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

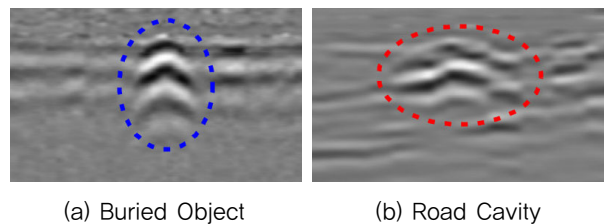


Fig. 10 GPR Signal Pattern in Road Cavity (B-scan)

#### 4.2. GPR 신호위상

일반적으로 포장체에서는 깊이가 증가할수록 유전율

이 큰 매질이 존재하므로, Fig. 11(a)에서 나타난 바와 같이 반사신호의 위상이 동일하게 나타난다. 하지만 유전율이 1인 동공이 존재한다면 동공상부에서의 반사신호는 Fig. 11(b)와 같이 (+)에서 (-)방향으로 위상이 역전되어 나타난다.

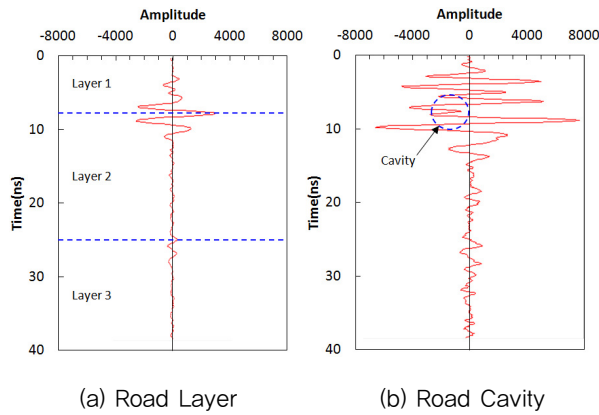


Fig. 11 Signal Phase between Upper Layer and Road Cavity (A-scan)

본 연구에서 분석된 GPR 신호를 분석한 결과 동공상부에서 (-)방향으로 위상이 역전되는 비율이 62%로 나타나 대다수를 차지했지만, 예외인 경우도 많이 발생하였다. 특히 동공이 노상, 보조기층에 발생한 경우에는 위상변화가 나타나지 않는 경우가 많았다. 이는 노상 및 보조기층 내 존재하는 불균질한 매질이 동공 주변 GPR 신호에 영향을 미쳐 위상변화가 일정하게 나타나지 않았을 것으로 판단된다. 또한 동공의 크기(깊이 방향)가 작은 경우, 동공의 위상변화가 나타나지 않았다(Fig. 12).

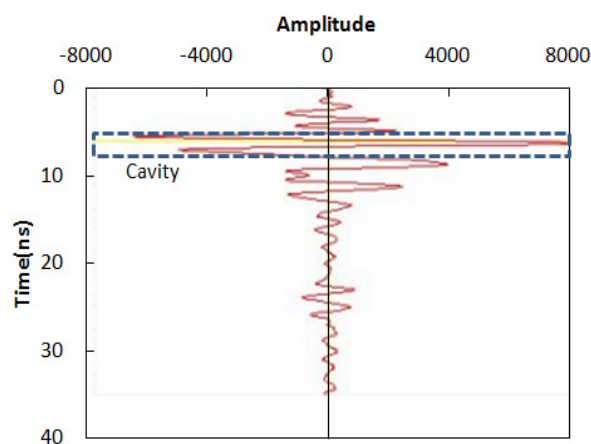


Fig. 12 No Reverse Signal in Cavity (A-scan, Cavity Thickness: 15cm)

이는 탐사에 사용된 주파수 파장의 길이가 동공의 두께보다 길어서 동공 하부에서 발생한 강한 (+)방향 신호

가 상부에서 발생한 (-)방향 신호와 간섭이 되어 위상변화를 확인할 수 없었던 것으로 판단된다. 본 연구에서는 중심주파수가 500MHz인 노면접지형 차폐 안테나를 사용하였다. 500MHz 안테나는  $1/500\text{MHz}=2\text{ns}$ 의 펄스주기를 가진다. 펄스의 파장은 펄스의 주기와 매질의 개략적인 속도의 곱과 같으므로 보조기층의 유전속도를  $0.15\text{m/ns}$ 라고 가정하면 파장은  $30\text{cm}(0.15\text{m/ns} \times 2\text{ns})$ 가 된다. 또한 수직분해능은 입사파 파장의 1/4로 정의되므로, 이론적인 수직분해능은  $7.5\text{cm}$ 가 된다. 실제 현장에서는 신호감쇠 및 잡음에 의해 수직분해능은 이론값보다 저하되게 된다. 따라서 규모가 작은 동공의 위상변화를 파악하기 위해서는 동공의 크기에 비해 GPR 신호 파장이 짧은, 즉 주파수가 높은 GPR 안테나를 사용할 경우 수직분해능이 증가하게 되므로 동공의 두께가 작은 지점에서의 위상변화가 감지될 것이다. 다만 주파수가 높은 안테나를 사용할 경우, 탐지할 수 있는 가탐심도가 낮아진다.

### 4.3. GPR 신호세기

GPR 신호는 유전율이 다른 매질 경계부에서 반사가 되며, 두 매질의 유전율 차이가 클수록 강한 반사파가 발생된다. 일반적으로 포장체를 구성하는 아스팔트의 유전율은 3~5, 건조한 보조기층 및 노상(모래, 자갈)은 4~6 정도의 범위를 가진다(ASTM D6432, 2011). 반면에 동공 내부의 비어 있는 공간은 유전율이 1로 가장 작은 공기가 차지하고 있다. 본 연구에서 파악한 대부분의 동공은 심도 0.7m 이내로 포장(아스콘)층과 보조기층 사이에 존재하고 있다. 따라서 동공에서 반사된 GPR 신호는 상대적인 유전율 차이가 크기 때문에 대부분 강한 신호로 나타난다.

Fig. 13은 동공 출현심도에 따른 신호세기를 나타낸 것이다. 전체적으로 심도가 깊어질수록 신호세기가 약해지는 경향이 나타났다. 하지만 동공이 위치한 매질의

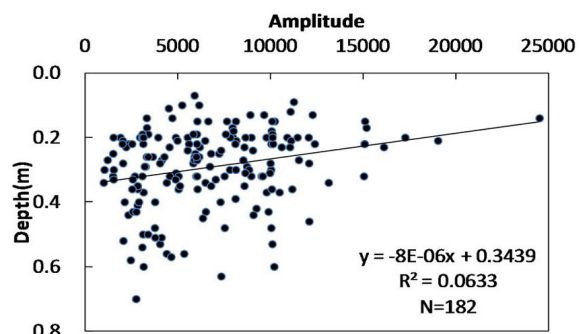


Fig. 13 Amplitude in Road Cavity

유전율 차이 등의 영향으로 심도와와의 상관성이 통계적으로 의미 있는 수준까지 나타나지는 않았다. 이는 토층이 습윤 상태인 경우 유전율이 25까지도 증가하기 때문에 하부에서도 신호세기가 크게 나타날 수 있다. 또한 동공의 크기가 작은 경우 동공의 상하 경계부에서 (+)와 (-) 방향의 신호가 일부 중첩되기 때문에 얇은 심도에서도 신호세기가 작게 나타날 수도 있다. 따라서 단순하게 신호세기로 동공 존재유무를 분석하기에는 한계가 있다.

따라서 현재의 자료만으로는 특정 신호세기가 나타날 경우, 동공이 존재한다고 판단하기에는 어려움이 있다. 따라서 현재의 분석수준으로는 A-scan을 보고 감쇠되는 반사 신호 중 신호가 급격하게 강해지는 부분의 신호 모양 및 위상변화를 참고하여 동공존재 가능성을 파악해야 할 것으로 판단된다.

#### 4.4. 종합 분석

본 연구에 사용된 GPR 신호를 분석한 결과 대다수(60%)의 동공 상부는 포장(아스팔트콘크리트)층까지 진행된 것으로 나타났다. 이러한 경우 동공에서 GPR 신호는 포물선 모양으로 나타나며(양 방향 포물선 모양 61%), 70%에서 위상변화를 확인할 수 있었다. 따라서 GPR 신호모양 및 위상변화 여부만으로도 아스팔트 콘크리트 층까지 확장한 동공여부를 파악하는 것이 가능할 것으로 판단된다. 또한 이러한 형태의 동공이 함몰로 진행될 위험성이 매우 크므로 우선적으로 파악하는 것이 필요하다.

반면에 동공이 보조기층 및 노상 등 상대적으로 깊은 심도에 존재하는 경우도 40% 나타났다. 이때 GPR 신호는 포물선 모양이 36%(양 방향 포물선모양 37%)로 포물선 파형으로 동공유무를 결정하기에는 어려운 수준으로 나타났다. 이는 위에서 언급한 바와 같이 불균질한 매질 및 지하매질물로 인한 GPR 신호의 교란이 심각하여 현재 분석 방식으로는 신뢰성이 낮은 것으로 판단된다. 따라서 향후 연구에서는 동공탐사의 신뢰성을 향상시키기 위하여 불균질한 매질 내에 존재하는 동공파악을 위한 GPR 신호 정밀 분석이 필요하다.

### 5. 결론 및 향후 연구과제

#### 5.1. 결론

본 연구에서는 도로함몰사고 예방사업의 일환으로 발견한 동공 204개소에 대해서 GPR 장비로 data를 획득하여 GPR 신호에 대한 형태분석을 실시하였다. 분석 결과는 다음과 같다.

1. 동공에서 발생한 GPR 신호는 평면상에서 원 또는 타원형태로 나타나고, 종단면도에서는 찌그러진 포물선 형태로 나타났다. 매질의 불균질성 또는 동공의 방향에 따라 한 방향 또는 양 방향으로 찌그러진 형태를 나타냈다.
2. 동공 상부 위치에서 GPR 신호 강도는 상대적으로 강하게 나타났다. 하지만 포장층 경계면이나 매질물 주변에서도 GPR 신호가 강하게 나타나므로 단순하게 신호 강도만으로 동공 존재여부를 파악하기는 한계가 있었다.
3. 아스팔트콘크리트 층까지 동공이 발달된 경우 대부분(62%) GPR 신호의 위상변화가 나타난다. 하지만 동공이 보조기층, 노상 등 불균질한 매질 내에 존재하는 경우에는 위상변화가 나타나지 않는 경우도 많이 발생하여 정밀하고, 추가적인 분석이 필요하다.
4. GPR 신호로부터 동공유무를 파악하기 위해서는 상기 언급한 신호모양, 신호세기, 위상변화, 주변 매질 조건 등을 복합적으로 고려하여야 한다.

#### 5.2. 향후 연구과제

본 연구에서 수행한 결과를 바탕으로 향후 다음과 같은 연구가 필요하다.

1. 지역별, 매질별로 GPR 반사 신호의 강도가 다르므로 이를 보정하기 위하여 각 매질의 유전율 특성을 고려한 GPR 신호 평가 방법이 필요하다.
2. 동공출현 심도, 매질의 종류 및 특성(함수율, 공극률 등), 지반이완 정도 등 주변 매질의 조건이 동공 위상 변화 및 신호세기에 미치는 영향에 대한 분석이 필요하다.
3. 보다 신뢰성 있는 분석결과를 얻기 위해서는 분석기술자의 경험에 의한 정성적인 분석보다는 GPR 신호 분석, 노면상태, 지지력 등의 데이터와 상관관계 연구를 통해 종합적, 정량적으로 평가할 수 있는 기법 연구가 필요하다.
4. 도로노면조사장비(Road scanner) 및 포장지지력 측정장비(Falling weight deflectometer, FWD 또는 Rolling dynamic deflectometer, RDD)와 같은 장비와 동시 운용하여 동공분석기술의 정밀도 향상을 위한 복합적인 탐사·분석이 필요하다.

#### 감사의 글

본 연구는 서울시 동공탐사기술 향상을 위한 연구의 일환

으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사의 말씀을 드립니다. 또한 국토교통부/교통물류연구사업의 연구비지원 (과제번호 15TLRP-C099511-01, 도로함몰 위험도 평가 및 분석기술 개발)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## REFERENCES

- Al-Qadi, I. L., Lahouar, S., and Loulizi, A. 2003. GPR: From the State-Of-the-Art to the State-Of-the-Practice, International Symposium of Non-destructive Testing in Civil Engineering, CD-ROM.
- ASTM D6432, 2011. Standard Guide for Using the surface Ground Penetrating Radar Method for subsurface Investigation, American Society for Testing and Materials.
- Baek, J., Choi, J.S. 2014, Investigation of Substructure under the Roads Using Ground Penetrating Radar (GPR), Road Engineers Vol. 16, No. 2, pp. 11 - 16.
- Conyers, L. B., 2015. Analysis and Interpretation of GPR Datasets for Integrated Archaeological Mapping, European Association of Geoscientists & Engineers, Near Surface Geophysics, Vol. 13.
- Duan, C., Wu, R., and Liu, J., 2011. Estimation of Airfield Pavement Void Thickness Using GPR, 2011 3<sup>rd</sup> International Asia-Pacific Conference, 1-4.
- Kim, Y.-T., Kim, B., Kim, J.-W., Park, H.-M., and Yoon, J.-S., 2016. Determining the Optimal Frequency of Ground Penetrating Radar for Detecting Void in Pavement, International Journal of Highway Engineering, Vol. 18, No. 2. 37-42.
- Kong, H., Kim S., Kim, M., and Han S., 2012. A Preprocessing Method for Ground-Penetrating-Radar based Land-mine Detection System, Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers, Vol. 50, No. 4. 931-941.