

## 도로동공 탐지에 적합한 GPR 타입 선정에 관한 연구

### A Study on the Selection of GPR Type Suitable for Road Cavity Detection

김연태	Kim, Yeon Tae	정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구소 신진연구원 (E-mail : kyt@kict.re.kr)
최지영	Choi, Ji Young	정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구소 수석연구원 (E-mail : legion@kict.re.kr)
김기덕	Kim, Ki Deok	정회원 · 세종대학교 건설환경공학과 박사과정 (E-mail : paestum3@naver.com)
박희문	Park, Hee Mun	정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구소 연구위원 · 공학박사 · 교신저자 (E-mail : hpark@kict.re.kr)

#### ABSTRACT

**PURPOSES :** The purpose of this study is to evaluate different types of Ground Penetrating Radar (GPR) testing for characterizing the road cavity detection. The impulse and step-frequency-type GPR tests were conducted on a full-scale testbed with an artificial void installation. After analyzing the response signals of GPR tests for detecting the road cavity, the characteristics of each GPR response was evaluated for a suitable selection of GPR tests.

**METHODS :** Two different types of GPR tests were performed to estimate the limitation and accuracy for detecting the cavities underneath the asphalt pavement. The GPR signal responses were obtained from the testbed with different cavity sizes and depths. The detection limitation was identified by a signal penetration depth at a given cavity for impulse and step-frequency-type GPR testing. The unique signal characteristics was also observed at cavity sections.

**RESULTS :** The impulse-type GPR detected the 500-mm length of cavity at a depth of 1.0 m, and the step-frequency-type GPR detected the cavity up to 1.5 m. This indicates that the detection capacity of the step-frequency type is better than the impulse type. The step-frequency GPR testing also can reflect the howling phenomena that can more accurately determine the cavity.

**CONCLUSIONS :** It is found from this study that the step-frequency GPR testing is more suitable for the road cavity detection of asphalt pavement. The use of step-frequency GPR testing shows a distinct image at the cavity occurrences.

#### Keywords

*Ground Penetrating Radar, Impulse, Step-Frequency, Simulated Road Cavity, Testbed*

Corresponding Author : Park, Hee Mun, Research Fellow  
Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283,  
Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, 10223, Korea  
Tel : +82.31.910.0323 Fax : +82.31.910.0161  
E-mail : hpark@kict.re.kr

International Journal of Highway Engineering

<http://www.ksre.or.kr/>

ISSN 1738-7159 (Print)

ISSN 2287-3678 (Online)

Received Aug. 11, 2017 Revised Sep. 10, 2017 Accepted Sep. 13, 2017

## 1. 서론

최근 도로동공 탐지와 관련하여 Ground Penetrating Radar(GPR) 장비를 활용한 연구가 가장 활발하게 수행되고 있다. GPR 장비를 이용한 지반 탐사는 30~40

년 전부터 폭 넓은 분야에서 발전하였으며, 도로 하부 조사 외에도 광산의 자원 매장량 탐지, 지중구조물 조사, 지구물리학의 지층 정보를 제공하는 용도로 광범위하게 사용되고 있다(David J, 2005). GPR장비의 올바

른 시험을 위해서는 시험 목적에 적합한 GPR 종류 선정 및 주파수를 사용해야 한다. GPR의 주파수 별 특징은 주파수가 낮을수록 조사심도가 깊어지는 반면 깊이별 해상도는 낮아지고, 주파수가 높을수록 조사심도는 얕아지지만 깊이별 해상도가 높아진다. 따라서, 도로 및 철도 분야의 경우 조사연장이 길고, 교통통제를 최소화하기 위해 조사심도가 약 1~2m인 1.0GHz~2.0GHz의 고주파영역의 안테나가 주로 사용된다. 또한, 지반조사의 경우 조사심도가 5~20m 정도로 깊기 때문에 30~500MHz 영역대의 주파수를 사용해야 한다(Park et al., 2015). 국내에서도 Step Frequency 방식의 GPR 장비를 도입함에 따라 기존의 Impulse 방식의 단점을 해소하고 보다 정확하고 신속한 탐지가 구현되고 있다. Impulse 방식 GPR의 경우 대규모 면적에 대한 조사 시 데이터 수집에 많은 시간이 소요되거나 조사 적용 범위에 한계가 있지만 Step Frequency 방식의 GPR은 지표와 가까운 곳에서부터 비교적 깊은 곳의 매설물까지 탐지가 가능하고, 일회에 다양한 범위의 심도를 조사할 수 있는 장점이 있다. 또한, 데이터 취득 시 Impulse 방식보다 보다 수직해상도가 높은 데이터를 얻을 수 있다(Neil Linford et al., 2010).

본 논문에서는 도로동공 탐지에 있어서 GPR 탐사 방식에 따른 주요 특성을 파악하기 위해 모의 동공을 모사한 한국건설기술연구원 실험용 테스트베드에서 검증 연구를 수행하였다. 본 연구를 통하여 도로하부에 동공발생 시 GPR 시험방식에 따른 GPR 신호파의 특성을 평가하고자 한다.

## 2. GPR 타입별 특징

### 2.1. Impulse GPR의 기본 원리

GPR은 크게 Impulse 방식과 Step-Frequency 방식으로 구분된다. Impulse 방식이란 Fig. 1과 같이 송수신 안테나, 제어장치 및 통신부로 구성되며, 1개의 중심주파수로 대역이 넓지 않은 포장하부의 상태를 조사하는 방식이다. 송수신 안테나는 가장 중요한 부분으로서 제어장치에서 발생한 전자파 신호를 송신시키고, 대상 물체에서 반사되어 돌아오는 신호를 수신하는 장치이다. 제어장치는 시스템 전체를 제어하고 수신기로부터 측정된 신호를 기록 및 저장하여 자료를 처리하는 역할을 한다. 제어장치에서는 수신 신호가 기록되는 최초의 시간, 아날로그 신호인 수신신호의 디지털 샘플링 간격, 신호가 기록되는 전체 시간 범위 등 GPR 탐사에 필

요한 여러 변수들을 결정한다. 그리고 변수에 적합한 송수신 신호를 발생시켜 증폭시킨 후 송신안테나를 통해 방사하며, 수신안테나를 통해 수신된 신호를 증폭시켜 기록한다. 또한, 조사 구간에 따른 샘플링 간격 및 개수를 결정한다(David, J., 1996).

GPR 장비에서 방사되는 전자파가 지면을 투과하는 과정에서 손실이 크기 때문에 일반적인 레이더에 비해 탐지거리가 짧은 경향이 있고, 측정 시 외부 방해요인을 제거해야 정확한 값을 얻을 수 있다. GPR 데이터의 출력화면에서 도로 하부의 동공은 Fig. 2와 같이 포물선 형태로 표현되는데, 이는 GPR에서 송수신하는데 걸리는 시간과 신호의 진폭을 감지하여 데이터를 구현하기 때문이다(Kim et al., 2016).

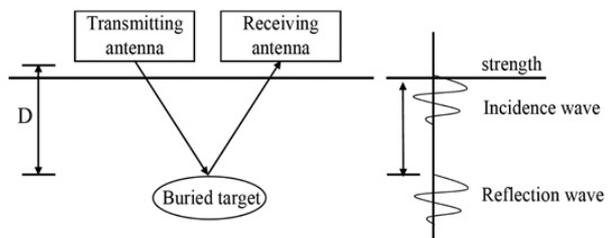


Fig. 1 Schematics of GPR Testing (Kim et al., 2016)

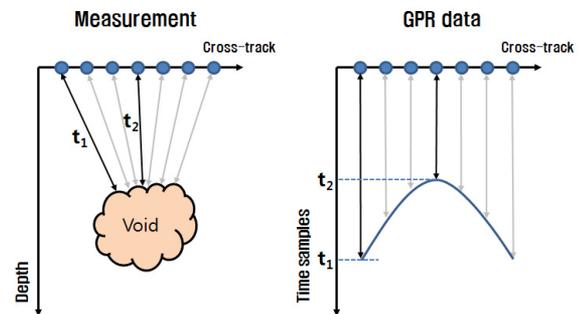


Fig. 2 Parabolic Signature in the GPR Data (Kim et al., 2016)

### 2.2. Step Frequency GPR의 특징

Step Frequency 방법은 Fig. 3과 같이 주파수 대역폭을 y축으로 표시하고, 데이터 수집 시간을 x축으로 나타낼 수 있다. x축과 기울기가 같이 그려지는 표식은 각 주파수의 개수 N과 같으며, 표식의 길이는 각 주파수에서 측정하는 시간 Dwell time이다. y축은 저주파수에서 고주파수 영역대까지의 간격 Frequency step을 나타낸다.

Step Frequency 신호의 출력은 프로그래밍된 Dwell time동안 연속해서 받아들이며, 이를 단면으로 나타내기 위해 시간별 도메인으로 변환되고 이 때 수집된 데이터를

바탕으로 단면화시킬 수 있다(FHWA, 2010).

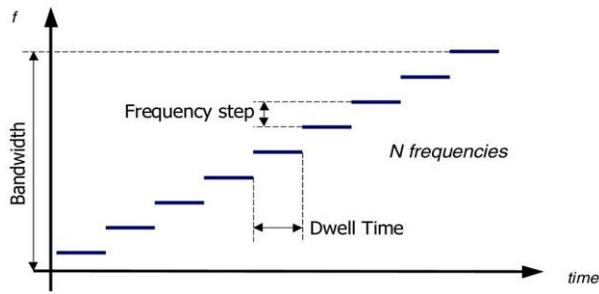


Fig. 3 Chart. SF GPR Emissions and Their Characteristics (FHWA, 2010)

시간에 따른 Step Frequency 파형의 모습은 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다(Brian et al., 2013). 시간에 따른 주파수 영역대가 증가함에 따라 파형의 주기는 짧아지는 경향을 볼 수 있다.

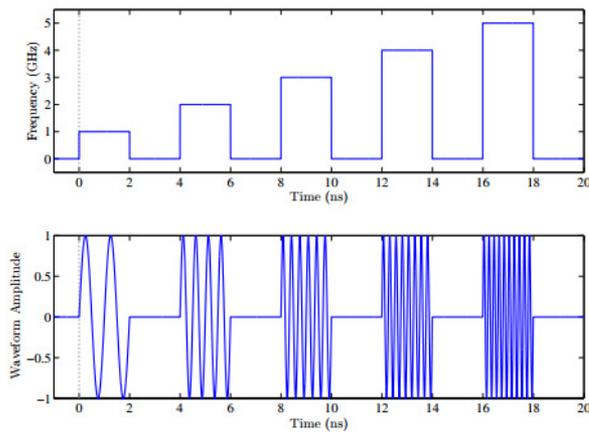


Fig. 4 Step Frequency Waveform

물체의 거리는 시간 영역에서 수신된 신호의 지연 시간으로부터 알 수 있는데 주파수 영역의 기준 신호와 반사 신호의 합성에 대한 Inverse Fourier Transform에 의해 알아낼 수 있으며, Eq. (1)~(3)은 이에 대한 기본적인 공식이다(Alan. V. Oppenheim et al., 1999).

$$x(t) * h(t) \xrightarrow{F} X(f) \cdot H(f) \quad (1)$$

$$x(t) \cdot h(t) \xrightarrow{F} X(f) * H(f) \quad (2)$$

$$x(t - t_0) \xrightarrow{F} e^{-j2\pi f t_0} X(f) \quad (3)$$

Fig. 5는 Step Frequency 레이더의 기본적인 구조를 나타내며, 송신안테나를 통해 송신된 신호가 물체에 반사되어 지연시간을 갖고 수신기로 들어온 기준 신호

와 합성하여 Inverse Fourier Transform을 취해 시간 영역으로 변환하면 지연된 시간에 의해 물체의 위치를 파악할 수 있는 방식이다(Alan. J. Wilkinson et al., 1998 and Brian et al., 2013).

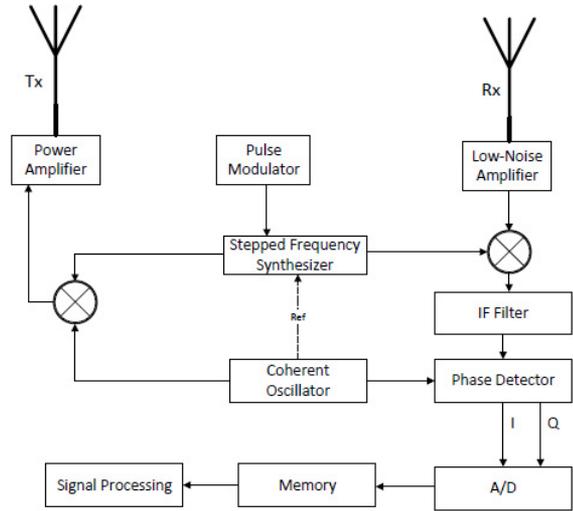


Fig. 5 Step Frequency Radar Block Diagram

Step Frequency 방식은 한번에 많은 주파수 영역대의 측정 데이터를 획득할 수 있는 장점이 있어 원하는 영역대의 결과를 사용자가 임의로 선택할 수 있다. 하지만 앞서 언급하였듯 한 지점의 결과를 취득하기 위한 시간이 Impulse 방식과 비교했을 때 오래 걸리는 단점이 있다(David. A. Noon., 1996). 최근에는 Step Frequency 방식의 GPR 장비의 시스템 고도화로 시간차이가 미미할 정도로 개선되었다.

### 3. GPR 실험을 위한 실대형 테스트베드 구축

#### 3.1. 1차 테스트베드 구축

한국건설기술연구원에서는 GPR 주파수 영역대별 도로동공 탐사심도의 한계를 파악하기 위해 2015년 안동 하천시험센터에 Fig. 6과 같이 길이 15m, 폭 6m 깊이의 아스팔트 포장 구간을 건설하였다. 본 구간에 최대 2m 깊이까지 다양한 크기의 모의동공을 Fig. 7(a)와 같이 구축하였다(Kim et al., 2016). Fig. 7(b)와 같이 모의동공의 재질은 스티로폼을 사용하였으며, 그 이유는 스티로폼이 공기와 유전상수가 유사하여 동공으로 모사하기에 적합하다 판단했기 때문이다(Al-Qadi et al., 2014). 보조기층의 경우 사질토로 균일하게 매립 후 다짐하였으며, 표층은 일반 아스팔트 혼합물을 200mm 두께로 포설했다. 모의 동공은 정육면체로 300mm,

500mm, 700mm, 900mm 크기로 제작하였고, 직육면체의 모형도 파형 비교를 위해 측면에 매설하였다. 모의 동공 매설 깊이는 표층에서부터 0.7m, 1.0m, 1.5m, 2.0m 깊이로 매설하였다. 테스트베드의 A-A' 단면도는 Fig. 8과 같고, Fig. 9는 B-B' 단면도를 나타낸 것이다.

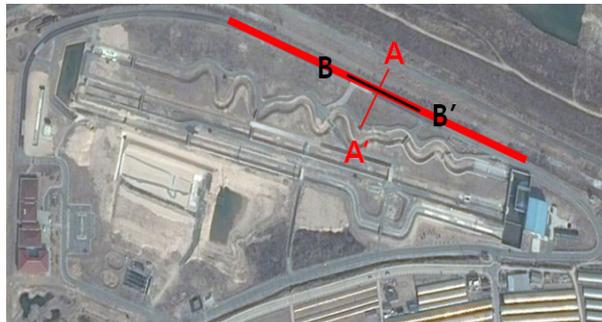


Fig 6. Test Bed Sectional Configuration (Inside of River Experiment Center in KICT)



Fig. 7 Pavement Removal & Installing Styrofoam

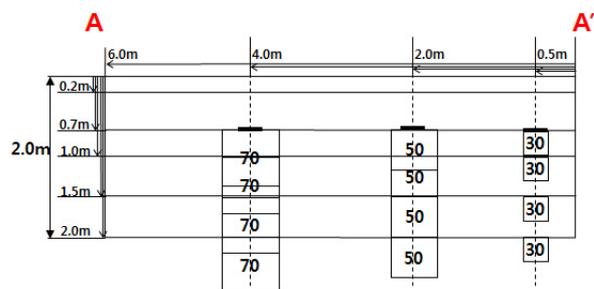


Fig. 8 Artificial Cavity Sectional Configuration (A-A')

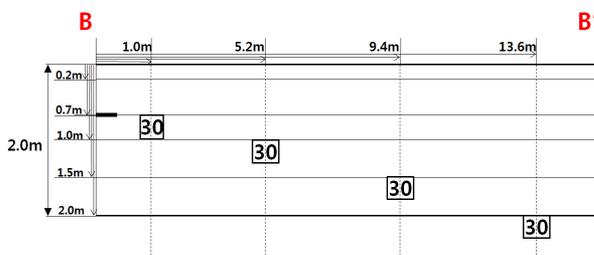


Fig. 9 Artificial Cavity Sectional Configuration (B-B' 30cm Section)

GPR 신호의 시작점을 확인하기 위해 각 노선별 시작 위치에 Fig. 10과 같이 300mm 크기의 철판을 매설하였다. 이는 철판의 신호를 시작점으로 각 모의동공까지의 거리를 정확하게 파악하기 위한 방법이다.

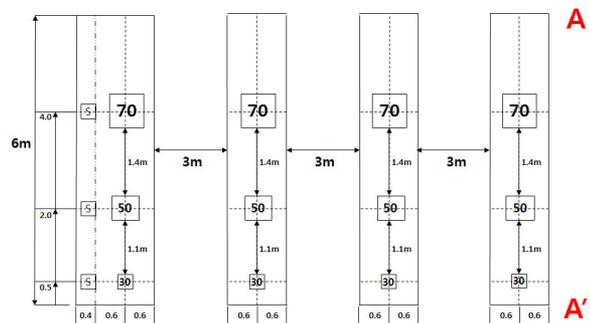


Fig. 10 Artificial Cavity Sectional Configuration (Plane View)

### 3.2. 2차 테스트베드 구축

2차 테스트베드는 한국건설기술연구원 일산 본원 테스트베드 부지에 Fig. 11과 같이 구축하였다. 1차 테스트베드와 달리 모의동공의 재질을 스티로폼이 아닌 얼음으로 모사하였고, 크기는 너비×길이×높이 각각 0.5m×1m×0.5m로 제작하였다. 사전실험을 통해 얼음이 모의동공으로 적합하다 판단하였고, 매설 후 물의 배수를 위해 Fig. 12와 같이 테스트베드 하부에 40mm 이상 단인도 골재를 포설하여 배수층을 만들었다. 테스트베드 구축 후 동공 내부의 모습은 Fig. 13과 같다.



Fig. 11 Artificial Cavity Installation

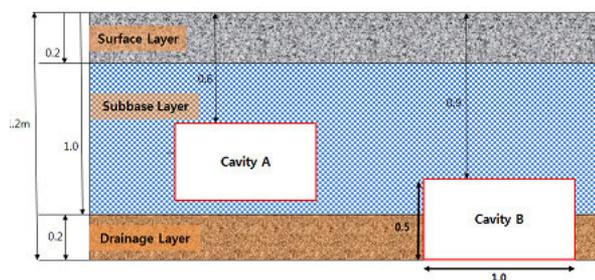


Fig. 12 Artificial Cavity Sectional Configuration



Fig. 13 Inside View of Cavity

## 4. GPR 시험 수행

### 4.1. Impulse GPR 시험

특정 주파수의 안테나를 사용하는 Impulse 방식의 GPR 시험을 위해 한국건설기술연구원에서 보유한 500MHz 중심주파수의 GPR 장비로 시험을 수행하였다. 본 장비는 스웨덴의 M사 장비로 서울시 등에서 사용되는 장비이다. Fig. 14는 2차 테스트베드에서 동공 주변을 여러 차례 왕복하여 위치별 동공의 포물선 형상을 파악하는 모습이다.



Fig. 14 Impulse Type GPR Testing

### 4.2. Step Frequency GPR 시험

다양한 영역대의 주파수의 안테나를 사용하는 Step Frequency 방식의 GPR 시험을 위해 세종대학교에서 보유한 GPR 장비로 시험을 수행하였다. Fig. 15는 1차 테스트베드에서 동공 주변을 여러 차례 왕복하여 위치별 동공의 포물선 형상을 파악하는 모습이다.



Fig. 15 Step Frequency Type GPR Testing

트베드에서 노르웨이의 T사 장비로 실시하는 모습이며, 본 장비는 한국시설안전공단 등에서 사용되는 장비이다.

## 5. GPR 시험 결과 분석

### 5.1. 1차 테스트베드에서의 GPR 결과 분석

1차 테스트베드에서 Fig. 9의 B'→B 방향으로 조사한 결과를 Fig. 16과 같이 나타내었다. 조사 화면을 확대해 보면 포장하부 1.0m 지점에 매설되어 있는 동공까지 파악이 가능한 것으로 판단되었다. 또한 포장층 경계부와 철판이 위치한 지역은 더욱 선명하고 위로 뾰족한 형태의 포물선 형태로 보여지는 것으로 확인되었다. 기존 포장층과 달리 시공된 부분의 기층 부분이 매끄럽지 못한 이유는 교란된 지반에서 나타나는 신호특성으로 보여진다.

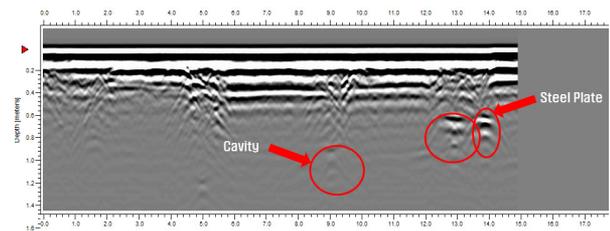


Fig. 16 Impulse Type GPR Test Result (1st Testbed)

Step Frequency 방식의 GPR 장비를 1차 테스트베드에서 Fig. 9의 B→B' 방향으로 조사한 결과를 Fig. 17, 18과 같이 나타내었다. Fig. 17은 지표에서 가장 가까운 0.7m 심도의 모의 동공을 포착하였을 때의 화면이며, Fig. 18은 1.5m 심도의 동공을 포착하였을 때의 화면이다. Step Frequency 방식은 단면도와 평면도를 동시에 확인할 수 있는 장점이 있다. 또한, GPS가 장착되어 있

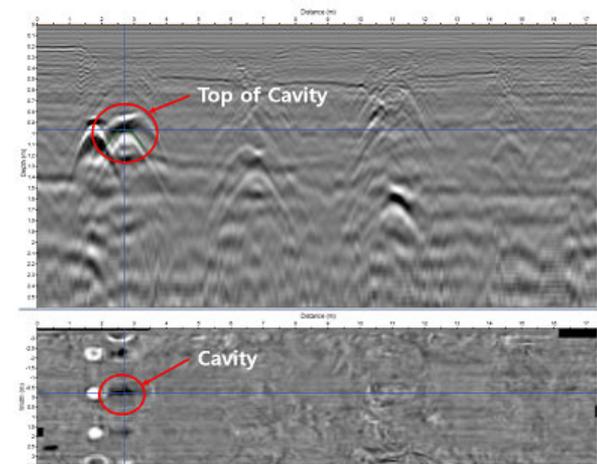


Fig. 17 Step Frequency Type GPR Test Result (1st Testbed 0.3m)

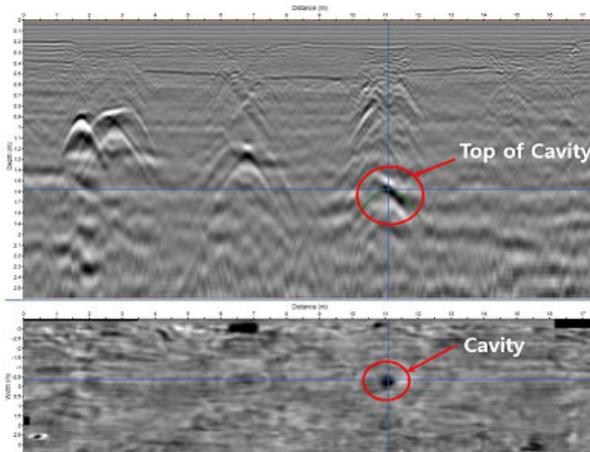


Fig. 18 Step Frequency Type GPR Test Result (1st Testbed 1.0m)

어 조사위치의 정확한 좌표까지 제공한다. 원하는 심도 외의 부분은 흐리게 나타나 원하는 부분을 부각되게 볼 수 있다. Impulse 방식의 GPR 데이터와 비교하였을 때, 포물선의 형태는 비슷한 것으로 나타났고 포물선의 선명도는 비교적 명확하게 관찰할 수 있는 것으로 판단되었다.

1차 테스트베드에서 각 주파수 방식별로 동공의 육안 탐지 가능 여부를 Table 1, 2와 같이 정리하였다. Impulse 방식의 경우 크기 30cm의 동공은 0.7m까지, 크기가 50cm 이상인 동공은 1.0m까지 탐지가 되는 것으로 파악되었다. Step Frequency 방식의 경우 크기 30cm의 동공은 1.0m까지, 크기가 50cm 이상인 동공은 1.5m까지 탐지가 되는 것으로 파악되었다. 따라서, 중심주파수 500MHz인 Impulse 방식으로는 탐사 심도 한계가 1.0m인 것으로 나타났고, Step Frequency 방식은 1.5m인 것으로 나타났다.

Table 1. Limitation of Detection Range (Impulse Type)

Depth \ Size	30cm	50cm	70cm
0.7m	○	○	○
1.0m	×	○	○
1.5m	×	×	×

Table 2. Limitation of Detection Range (Step Frequency Type)

Depth \ Size	30cm	50cm	70cm
0.7m	○	○	○
1.0m	○	○	○
1.5m	×	○	○

## 5.2. 2차 테스트베드에서의 GPR 결과 분석

2차 테스트베드에서 조사한 결과를 Fig. 19와 같이 나타내었다. 2차 테스트베드는 얼음을 매설하여 시공한 후 자연적으로 실제 동공을 모사한 테스트베드로서 사전 실험을 통해 동공 생성 시기를 예측하여 실험을 수행하였다. Fig. 16과 비교했을 때, 포물선의 형상이 넓고 매끄럽지 않은 것을 볼 수 있는데 이는 얼음이 융설될 때 얼음 위에 포설된 보조기층 일부가 떨어져 나가면서 발생한 것으로 생각된다.

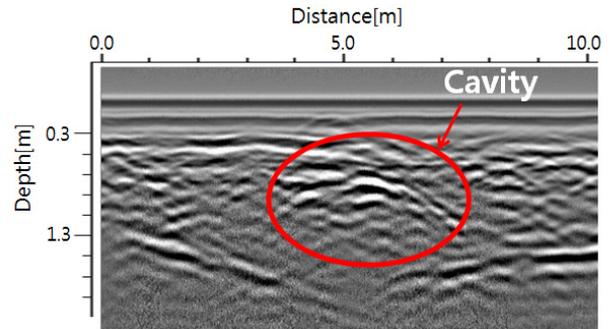


Fig. 19 Impulse Type GPR Test Result (2nd Testbed)

Step Frequency 방식의 GPR 장비를 2차 테스트베드에서 조사한 결과는 Fig. 20과 같으며, 1차 테스트베드 결과와 비교하였을 때 타입별 차이가 두드러지는 것으로 나타났다. Impulse 방식보다 Step Frequency 방식의 GPR 결과 화면에서의 동공의 포물선이 명확하고, 평면도 상에 동공의 면적까지 가늠할 수 있을 정도의 정확성을 띄는 것으로 나타났다. 또한 1차 테스트베드와 달리 동공의 아래쪽까지 진한 띠의 형태가 겹쳐서 나타

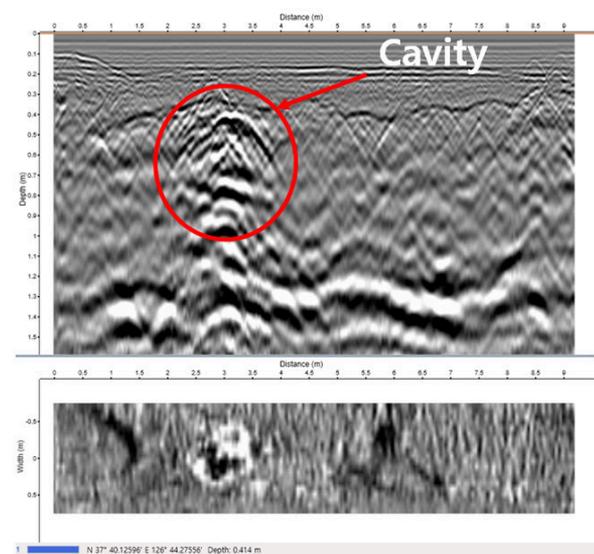


Fig. 20 Step Frequency Type GPR Test Result (2nd Testbed)

나는데 이는 비어 있는 공간에서의 전자기파의 울림현상 (Howling) 때문인 것으로 판단되며, Step Frequency 방식의 GPR이 울림현상을 극대화하여 동공임을 명확하게 탐지할 수 있는 장비로 생각된다.

## 6. 결론

본 논문에서는 지반탐지에 가장 많이 사용되는 비파괴 실험 장비인 GPR의 주파수 방식별 탐지 성능 평가와 관련된 실험을 실시하였다. 탐지 성능 평가를 위해 두 곳에 테스트베드를 구축하였고, Impulse 방식과 Step Frequency 방식의 데이터를 각각 비교하였다. 도로 하부에 동공이 존재할 때, 주파수 타입별 시험 결과는 다음과 같다. 다음 결과를 토대로 향후 포장가속시험을 수행하고 동공이 확장함에 따라 신호가 어떻게 변화하는지에 대한 연구의 자료로 활용할 예정이다.

1. 국내에서 도로하부 조사를 위해 주로 사용되는 Impulse 방식의 GPR 장비와 최근 도입된 Step Frequency 방식의 GPR 장비의 성능을 비교하기 위해 도로함몰을 모사한 테스트베드를 구축하였다.
2. 모의 동공으로 매설한 스티로폼과 얼음이 녹은 후 GPR실험을 하였을 때의 각 GPR 신호의 차이점을 파악할 수 있었다. 스티로폼을 매설한 테스트베드의 경우 매끈한 포물선형태가 보였고, 주변 간섭이 거의 없는 형상이 나타나는 것으로 확인하였고, 얼음을 매설한 테스트베드의 경우 스티로폼과 달리 선명한 신호를 보이지만 주변의 지반이 느슨해지는 영향으로 일그러진 포물선 형태로 보이는 것을 확인하였다.
3. 단채널 Impulse 방식의 GPR은 실제 동공이 위치한 지점 직상부를 측정해야 올바른 포물선의 형태로 나타나거나 동공의 여부를 가늠할 수 있지만 Step Frequency 방식의 GPR은 비교적 넓은 구간을 한번에 측정할 수 있어 넓은 구간에서 동공의 위치를 신속하게 판단할 수 있는 장점이 있다.
4. 1차 테스트베드에서 동공의 크기별, 깊이별 탐사 한계 파악을 위한 테스트 결과, 중심주파수 500MHz 인 Impulse 방식의 경우 50cm 크기의 동공은 1.0m까지 육안으로 확인할 수 있었으며, Step-Frequency 방식은 같은 조건에서 1.5m까지 확인이 가능하였다.

5. Impulse 방식 GPR의 경우 주파수에 따라 특정 심도를 관찰할 수 있는 한계가 있지만 Step Frequency 방식 GPR은 1회 조사에서 심도별 데이터를 각각 분석할 수 있어 유연하게 조사 심도를 선택할 수 있는 장점이 있는 것으로 파악되었다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부/ 교통물류연구개발사업의 연구비지원(과제번호 17TLRP-C099510-03)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## REFERENCES

- Alan. V. Oppenheim, Alan. S. Willsky. (1999). *Signals and Systems*, pp.394-395.
- Al-Qadi, I. L., Leng, Z., Lahouar, S., Baek, J. (2014). In-Place Hot-Mix Asphalt Density Estimation Using Ground-Penetrating Radar, *Transportation Research Record*, Vol.2152, pp.19-27.
- Andrew. J. Wilkinson, Richard. T. Lord, and Michael. R. Inngs. (1998). Stepped-frequency processing by reconstruction of target reflectivity spectrum, *South African Symp. on Communication and Signal Processing*, pp.101-104.
- Brian R. Phelan, Marc A. Ressler, Gregory J. Mazzaro, Kelly D. Sherbondy, and Ram M. Narayanan. (2013). Design of Spectrally Versatile Forward-Looking Ground Penetrating Radar for Detection of Concealed Targets, *The International Society for Optics and Photonics*, Vol. 8714.
- David. A. Noon. (1996). *Stepped- frequency radar design and signal processing enhances ground penetrating radar performance*, Doctoral thesis, University of Queensland, AU.
- David J. Daniels. (2005). *Ground Penetrating Radar. Encyclopedia of RF and Microwave Engineering*. John Willy & Sons, Inc.
- David, J. Daniels, (1996). Surface Penetrating Radar, *The Institution of Electrical Engineers*, Vol.8, Issue.4, pp.165-182.
- Federal Highway Administration Research and Technology (2010). *Step Frequency Ground Penetrating Radar Characterization and Federal Evaluation Tests*, Research Report.
- Kim, Yeon Tae, Kim, Booil, Kim, Je Won, Park, Hee Mun. (2016). Determining the Optimal Frequency of Ground Penetrating Radar for Detecting Voids in Pavements, *International Journal of Highway Engineering*, Vol. 18, No. 2, pp.37-42.
- Neil Linford, Paul Linford, Louise Martin, Andy Payne. (2010). *Stepped frequency ground-penetrating radar survey with a multi-element array antenna: Results from field application on archaeological sites*, Vol. 17, Issue 3, pp.187-198.
- Park, Jeong Jun, Han, Jung Geun, Yoo, Seung Kyeong, Hong, Ki Gwon. (2015). GPR technology for exploring road cavity in the ground, *Journal of the Korean geosynthetics society*, Vol.14, No.3, pp.12-17.