

도로동공 탐지를 위한 지표투과레이더의 적정 주파수 선정에 관한 연구

Determining the Optimal Frequency of Ground Penetrating Radar for Detecting Voids in Pavements

김 연 태 Kim, Yeon Tae
김 부 일 Kim, Booil
김 제 원 Kim, Je Won
박 희 문 Park, Hee Mun
윤 진 성 Yoon, Jin Sung

정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구소 전임연구원 (E-mail : kyt@kict.re.kr)
정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구소 연구위원 · 공학박사 (E-mail : bikim@kict.re.kr)
정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구소 수석연구원 (E-mail : jeworkim@kict.re.kr)
정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구소 연구위원 · 공학박사 · 교신저자 (E-mail : hpark@kict.re.kr)
정회원 · 서울특별시 품질시험소 도로포장연구센터 주무관 (E-mail : jsyoon94@seoul.go.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : The objective of this study is to determine the optimal frequency of ground penetrating radar (GPR) testing for detecting the voids under the pavement.

METHODS : In order to determine the optimal frequency of GPR testing for void detection, a full-scale test section was constructed to simulate the actual size of voids under the pavement. Voids of various sizes were created by inserting styrofoam at varying depths under the pavement. Subsequently, 250-, 500-, and 800-MHz ground-coupled GPR testing was conducted in the test section and the resulting GPR signals were recorded. The change in the amplitude of these signals was evaluated by varying the GPR frequency, void size, and void depth. The optimum frequency was determined from the amplitude of the signals.

RESULTS : The capacity of GPR to detect voids under the pavement was evaluated by using three different ground-coupled GPR frequencies. In the case of the B-scan GPR data, a parabolic shape occurred in the vicinity of the voids. The maximum GPR amplitude in the A-scan data was used to quantitatively determine the void-detection capacity.

CONCLUSIONS : The 250-MHz GPR testing enabled the detection of 10 out of 12 simulated voids, whereas the 500-MHz testing allowed the detection of only five. Furthermore, the amplitude of GPR detection associated with 250-MHz testing is significantly higher than that of 500-MHz testing. This indicates that 250-MHz GPR testing is well-suited for the detection of voids located at depths ranging from 0.5~2.0 m. Testing at frequencies lower than 250 MHz is recommended for void detection at depths greater than 2 m.

Keywords

ground penetrating radar, testbed, asphalt pavement, simulated void, amplitude

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 Nov. 30, 2015 Revised Dec. 02, 2015 Accepted Mar. 31, 2016

1. 서론

최근 국내에서는 도로의 일부가 급속도로 침하되어 차량이나 보행자가 동공으로 추락하는 등의 사고를 발생시키는 도로함몰 현상이 사회적으로 큰 문제로 대두되고

있다. 서울시에서 최근 5년간 도로침하, 동공, 함몰 발생 현황을 조사한 결과 총 3,328건이 발생하였으며, 연간 665건으로 발생건수가 점차 증가하는 추세이다(서울시, 2015). 주요 도로함몰 발생원인인 상하수관 손상 및 누수, 도로굴착 공사 불량, 지하수위 강하 등으로 발생한

도로침하 및 함몰 건수의 계절별 발생건수를 조사한 결과, 장마철인 여름과 해빙기에 발생건수가 매우 높은 것으로 밝혀졌다. 이러한 현상이 지속적으로 발생하고, 해당 내용을 언론이 대대적으로 보도함에 따라 국민 불안이 커지면서 이에 대한 대책 마련이 필요한 실정이다.

국내에서는 아직까지 도로함몰 위험구간 탐지 및 기술 개발에 대한 구체적인 연구가 매우 미비한 실정이다. 이러한 도로함몰 현상은 육안조사를 통해 파악하기에는 한계가 있어 코어채취나 굴착과 같은 파괴시험(Destructive Test)과 전기비저항 탐사나 지표투과레이더(Ground Penetrating Radar, GPR)를 이용하는 비파괴시험(Non-Destructive Test)으로 조사한다.

본 연구에서는 도로하부에서 발생한 동공을 정확하게 탐사하기 위한 GPR시험의 적정 주파수를 결정하고자 한다. 이를 위하여 실제 동공과 유전상수가 유사한 것으로 알려진 스티로폼을 활용한 도로동공 탐지용 테스트 베드를 실험크기로 제작하였다(Baek et al, 2014). GPR 주파수는 250MHz, 500MHz, 800MHz를 사용하였으며, 도로동공의 깊이 및 크기의 변화에 따른 GPR 신호 특성을 분석하여 도로동공 탐지에 적절한 GPR 주파수를 선정하였다.

2. GPR 기본 이론

2.1. GPR의 활용분야

국내에서 최근 지하 매설물 탐사 및 철도, 도로포장 하부상태 파악을 위해 주로 사용되고 있는 GPR 장비는 Table 1과 같이 토목, 건축 분야를 비롯하여 지질, 교통, 고고학, 환경 등 여러 분야에서 활용하는 것으로 파악되었다.

Table 1. Applications of GPR

Area	Application contents
Civil / Architectural engineering	<i>Obstruction detection</i> , inspection of steel reinforcement conditions, inspection of concrete thickness, verification of grouting effect, <i>void detection</i> , diagnosis of concrete and stone structures
Transportation	Inspection of pavement thickness, inspection of foundation of track sand roads, inspection of runway conditions

2.2. GPR 탐사 원리 및 특징

GPR은 60MHz-8GHz 범위의 전자기파를 지표와

접한 송신안테나를 통해 Fig. 1과 같이 주매질 내부로 방사시키고, 주매질 내부의 매질물에 부딪혀 반사되는 전파 분석을 통해 지층 내부를 탐사하는 장치로서, 현재 도로하부 동공탐사 분야에 적극적으로 활용 예정이다(손수정 외, 2000).

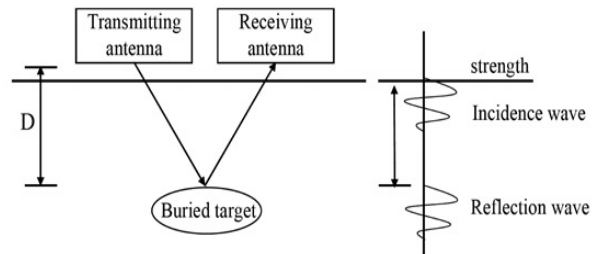


Fig. 1 Schematics of GPR Inspection (Son et al, 2000)

GPR 장비에서 방사되는 전자파가 지면을 투과하는 과정에서 손실이 크기 때문에 지표투과레이더는 일반적인 레이더에 비해 탐지 거리가 짧은 경향이 있고, 측정시 외부 방해요인을 제거해야 정확한 값을 얻을 수 있다. 또한, 다층으로 이루어진 아스팔트 및 콘크리트 포장에서도 GPR은 각 층별 두께 및 공극 여부를 확인하는데 활용된다. Fig. 2와 같이 A-scan 화면을 보고 각 층별 피크점을 파악하여 그 시간차로 두께를 추정하는 원리이다. 각 층의 매질이 바뀔 때 진폭의 크기가 변하며, 유전상수의 크기 차이에 따라 진폭의 방향이 +와 -방향으로 바뀐다(Duan et al., 2011).

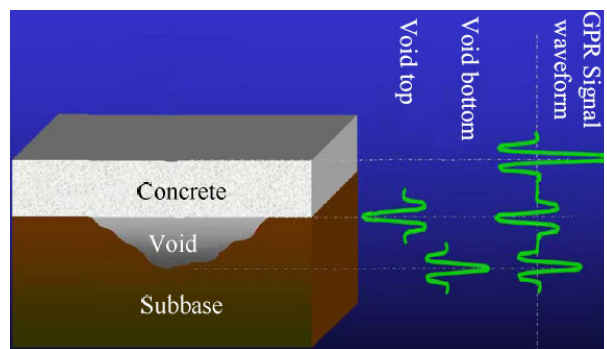


Fig. 2 Reflected Signal Waveform of Void (Duan et al, 2011)

Fig. 3과 같이 GPR B-scan에서 도로하부에 동공이 존재할 경우 포물선 형태로 표현된다. 이는 GPR에서 송수신하는데 걸리는 시간과 신호의 세기를 감지하여 데이터를 구현하기 때문이다. 각각의 측정점에서부터 지장물까지 도달시간의 차이에 따라 GPR에서 얻어지는 형상은 포물선으로 나타난다. 또한, Table 2와 같이 물질에 따라 고유의 유전율을 가지고 있는데 인접한 두

물질의 유전율의 차이가 클수록 포물선의 기울기가 크고 차이가 작을수록 포물선의 기울기가 완만하게 나타나는 것이 일반적이다. Table 3에 경험적인 데이터를 바탕으로 사용자가 선택할 수 있도록 주파수별 탐지 가능한 지장물의 크기와 한계 심도를 나타내었다(공해정외 2012; John M. Reynolds, 1997).

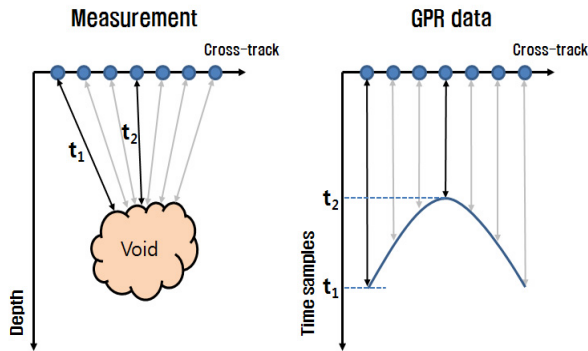


Fig. 3 Parabolic Signature in the GPR Data (Kong et al, 2012)

Table 2. Velocity in Certain Media (John M. Reynolds, 1997)

Medium	Dielectric constant (ϵ_r)	Velocity [m/ μ s]
Air	1	300
Fresh water	81	33
Limestone	7~16	75~113
Granite	5~7	113~134
Concrete	4~10	95~150
Clay	4~16	74~150
Silt	9~23	63~100
Sand	4~30	55~150
Ice	3~4	150~173

Table 3. Guidelines of the Antenna Frequency Selection (John M. Reynolds, 1997)

Antenna frequency(MHz)	Suitable target size(m)	Approximate depth range(m)
25	1.0	5~30
50	0.5	5~20
100	0.1~1.0	2~15
200~250	0.05~0.50	1~10
500	0.04	1~5
800	0.02	0.4~2

3. 테스트베드 시공

3.1. 모의동공 매설위치 선정

본 연구를 수행하기 위해 Fig. 4와 같이 경상북도 안

동에 위치한 한국건설기술연구원 안동하천실험센터 내 시험도로 약 15m 구간을 도로동공 모사시험 구간으로 선정하였다. 아스팔트 포장 하부에 도로동공 모사는 스티로폼을 제작하여 정해진 위치에 설치하였으며, 이는 공기와 스티로폼의 유전상수가 유사하여 GPR 장비가 획득하는 데이터의 파형이 비슷하기 때문이다(A1-Qadi et al, 2014).

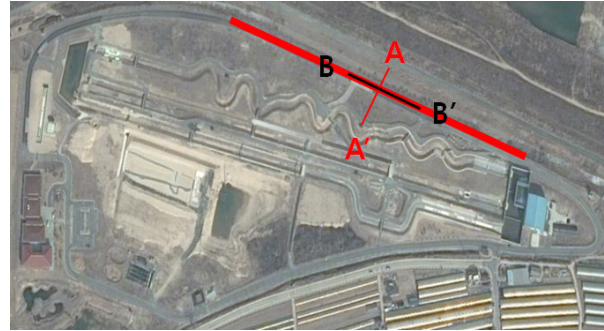


Fig. 4 Test Bed Sectional Configuration (Inside of River Experiment Center in KICT)

모의동공은 규격에 맞게 특수 제작하였으며, 각 축의 기준과 높이 기준을 잡기 위해 30cm×30cm 규격의 철판을 매립하였다. Fig. 5는 A-A' 단면 구성을 나타내었으며, A' 지점으로부터 0.5m, 2.0m, 4.0m, 6.0m 떨어진 곳에 다양한 크기의 모의동공을 매설하였다.

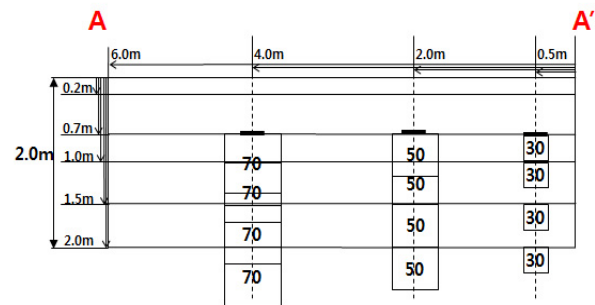


Fig. 5 Simulated Void Sectional Configuration (A-A')

Fig. 6은 B-B' 단면 구성을 나타내었으며, B지점으로부터 1.0m, 5.2m, 9.4m, 13.6m 떨어진 곳에 모의동

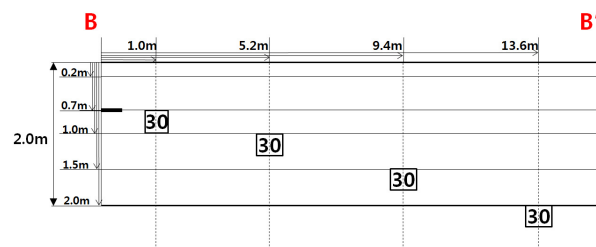


Fig. 6 Simulated Void Sectional Configuration (B-B' 30cm Section)

공을 매설하였다. 매설깊이는 포장 층 20cm를 포함하여 포장표면으로부터 0.7m, 1.0m, 1.5m, 2.0m로 설정하였으며, 스티로폼의 윗면이 설정한 깊이와 일치하도록 하였다. 테스트베드의 평면도는 Fig. 7과 같다. 각 동공위치별로 GPR 신호가 중첩되지 않게 하기 위하여 충분한 간격을 두어 스티로폼을 설치하였다.

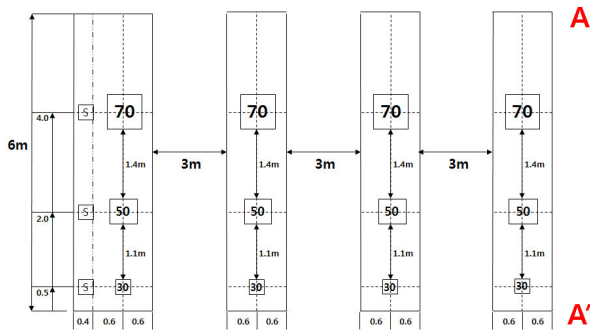


Fig. 7 Simulated Void Sectional Configuration (Plane View)

3.2. 모의동공 매립 및 아스콘 포설

기존 아스팔트 표층 및 중간층을 Fig. 8(a)와 같이 굴착 후, Fig. 8(b)와 같이 기준점 설정을 위한 철판과 스티로폼으로 제작한 모의동공을 깊이별로 매설 후 되메우기 하였다. Fig. 9와 같이 롤러다짐으로 기층의 높이를 일정하게 맞춘 후 Fig. 10과 같이 일반아스팔트를 20cm 두께로 포설 후 롤러를 이용하여 다짐하였다. 여기서, 보조기층과 노상은 모래계열로서 통일분류법의

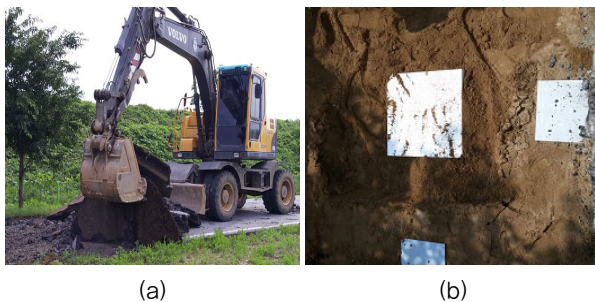


Fig. 8 Pavement Removal & Installing Styrofoam



Fig. 9 Backfilling and Compaction



Fig. 10 Asphalt Paving and Compaction

SW에 해당되는 사질토이다. 또한 아스팔트 혼합물은 중교통량 이하의 표층에 일반적으로 사용되는 WC-2를 사용하였으며, 아스팔트 혼합물 생산 및 시공 지침의 품질기준을 만족하도록 시공하였다.

4. GPR 측정 결과

4.1. GPR 결과 데이터 수집

테스트베드 시공을 완료한 후 GPR 주파수별 데이터 수집을 실시하였다. 본 논문에서는 Ground Coupled 방식의 M사 장비를 사용하였으며, 적용한 GPR 중심 주파수는 250MHz, 500MHz, 800MHz이다. 측정 방향은 Fig. 6에서 B'→B방향으로 진행하였다. B→B' 방향으로 진행 시 70cm에 매설된 모의동공이 철판의 전자파 간섭으로 측정이 어려울 것을 고려하여 모든 측정은 B'→B 방향으로 실시하였다.

측정은 주파수별 3회씩 총 9회 진행하였으며, Fig. 11과 같이 GPR 결과 분석 프로그램인 GPRLate를 사

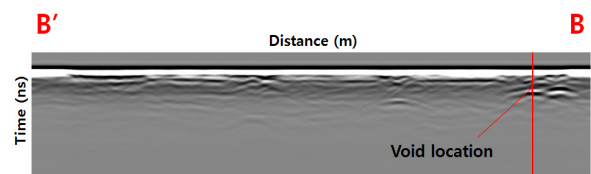


Fig. 11 B-scan Data (250MHz)

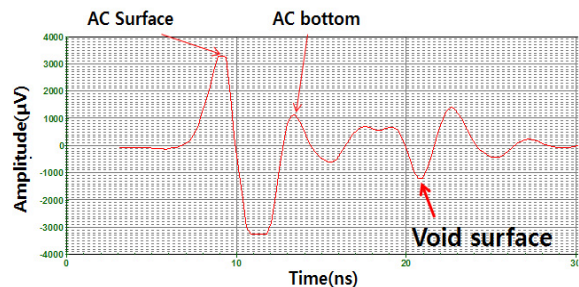


Fig. 12 A-scan Data (250MHz)

용하여 B-Scan화면을 출력하였다. 여기서, 포물선의 형태가 뚜렷하게 나타나는 지점을 탐지 가능한 모의동공이라 판단하고, 그 지점을 사용자가 선택하면 Fig. 12와 같이 해당 지점의 진폭을 확인할 수 있다. 여기서, 음수로 나타나는 진폭은 보조기층과 동공 상부의 경계부를 의미하고, 양수로 나타나는 진폭은 동공 하부와 보조기층의 경계부를 의미한다.

4.2. 주파수별 GPR 측정 결과

앞서 언급한 방법으로 주파수별 12지점씩 총 36개의 데이터를 얻었으며, 그 결과를 다음과 같이 정리하였다. 250MHz 주파수의 경우 Table 4와 같이 12개 모의동공 중 10개의 동공을 육안으로 확인할 수 있었으며, 여기서 A는 가로×세로×높이 30cm의 동공, B는 50cm, C는 70cm 크기의 동공이다.

Fig. 13과 같이 동공의 매설 깊이가 깊어짐에 따라 진폭의 크기가 줄어드는 경향이 나타났으며, 동공의 크기가 커질수록 진폭의 크기가 증가하는 것으로 파악되었다.

250MHz 주파수의 동공 탐지 임계한도는 가로×세로×높이 70cm 이상은 약 2.0m까지 가능하고, 50m 이하는 1.5m까지 탐지 가능한 것으로 파악되었다.

Table 4. Amplitude of Reflected GPR Signal at Void Location (250MHz)

Depth \ Size	A	B	C
0.7m	1200(μ V)	4000	4500
1.0m	1000	2500	3000
1.5m	1000	1000	2500
2.0m	N/A	N/A	1000

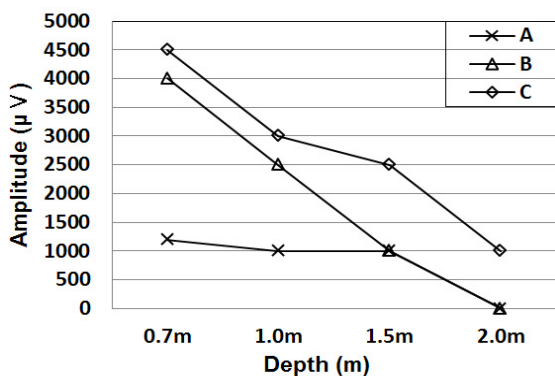


Fig. 13 Change of Amplitude with Increase of Void Depth (250MHz)

500MHz 주파수의 경우는 Table 5과 같이 12개의 모의동공 중 5개의 동공이 육안으로 식별 가능하였으

며, 깊이별 진폭의 경향은 Fig. 14와 같이 나타났다. 동공 탐지 임계한도는 가로×세로×높이 70cm 이상은 1.0m까지 가능하고, 30cm 이하는 0.7m까지 탐지 가능한 것으로 파악되었다.

그러나 800MHz의 경우 육안으로 식별 가능한 모의동공의 개수가 12개 모의동공 중 1개로 다른 주파수들에 비해 현저히 탐지능력이 떨어지는 것으로 파악되었다. 또한, 발견된 1개 지점에서의 진폭의 크기 또한 1000 μ V 이하로 250MHz, 500MHz 안테나와 비교하였을 때 동공 탐지용 주파수로는 효용성이 떨어지는 것으로 확인되었다. 이는 교란된 지반이 전파의 진행을 방해하여 심도가 깊어질수록 탐지가 어려운 것으로 판단되었다.

Table 5. Amplitude of Reflected GPR Signal at Void Location (500MHz)

Depth \ Size	A	B	C
0.7m	1000(μ V)	4000	4500
1.0m	N/A	1000	1000
1.5m	N/A	N/A	N/A

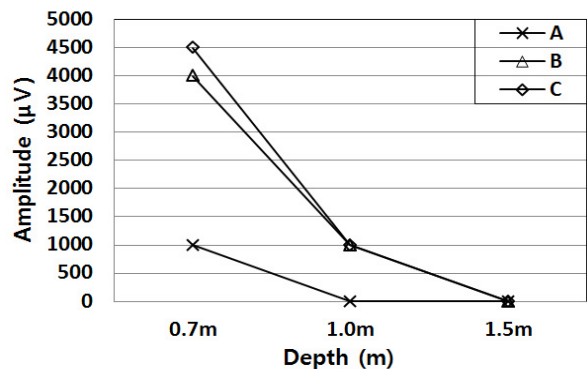


Fig. 14 Change of Amplitude with Increase of Void Depth (500MHz)

5. 결론 및 향후 연구과제

5.1. 결론

본 논문에서는 250MHz, 500MHz, 800MHz 주파수의 데이터를 이용하여 공기와 유전상수가 유사한 스티로폼으로 제작된 모의동공 탐지능력을 확인하였다. B-scan 화면에 나타난 형상이 포물선으로 나타날 때를 동공을 탐지하였다고 판단하고, 이 지점에서의 A-scan 데이터에 해당 심도의 피크점을 찾아 이때의 진폭을 읽어 결과 값으로 나타내었다.

250MHz 안테나의 경우 총 12개의 모의동공 중 10개, 500MHz 안테나는 5개, 800MHz 안테나는 1개의 모의동공을 탐지하였다. 또한 깊이별 진폭의 차이는 250MHz가 500MHz보다 컸으며, 이는 저주파수 안테나를 적용하면 매설 깊이를 추정하기 쉬울 것으로 판단되었다. 이와 같은 결과로 볼 때, 심도 0.5m~2.0m 사이의 동공을 탐지할 때 적합한 GPR 주파수는 250MHz, 심도 0.7m 이내는 500MHz, 표층 주변은 800MHz 안테나를 사용하는 것이 용이할 것으로 사료되었다. 또한 2m 이상의 깊은 심도의 동공을 탐지하고자 하는 경우는 250MHz 이하의 저주파수 안테나를 이용하는 것이 적합할 것으로 판단되었다. 주파수별 동공 크기에 따른 임계한도는 250MHz의 경우 2.0m 깊이 이내의 가로×세로×높이 70cm 이상인 것으로 나타났고, 500MHz의 경우 1.0m 깊이 이내의 가로×세로×높이 50cm 이상인 것으로 파악되었다.

5.2. 향후 연구과제

본 논문에서 수행한 결과를 바탕으로 향후 다음과 같은 연구를 추가로 수행할 예정이다.

1. 현재 지하 매설물 탐사 및 동공탐지를 위해 사용되는 50MHz-1GHz 주파수의 안테나 중 범위를 좁혀 최적주파수를 선정할 계획이다.
2. GPR 데이터 분석프로그램에서 예측한 모의동공의 심도와 실제 동공의 심도파악을 위해 코어 또는 시추를 통해 오차의 범위를 최소화할 예정이다.
3. 아스팔트 포장 두께 및 구조에 따른 안테나 감쇠율 또는 투과율에 대한 실험을 수행할 예정이다. 또한 포장층 하부 매질에 따른 신호 양상을 분석할 예정이다.
4. 스티로폼으로 제작했던 본 연구 외에 해외 문헌에서 소개된 Glucose(포도당 성분)와 얼음 등을 모의동공으로 제작하여 검증한 후 적합하다 판단되면 실대형 테스트베드를 구축할 예정이다.
5. 본 연구에 적용한 정육면체 모양의 스티로폼 외에 다

양한 형태의 스티로폼을 특수 제작하여 동일한 조건으로 실험하여 실제 동공 형상 모양과의 차이점을 분석해 볼 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 / 교통물류연구개발사업의 연구비 지원(과제번호 15TLRP-C099511-01)과 산업통상자원부/산업원천기술개발사업인 “도로교통시설물의 내부결함을 검출하기 위한 이동형 비접촉 고정밀 투과영상 탐지시스템 개발” 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- 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, 19-27.
- 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.
- Baek, Jongeun, Choi, Jaesoon. 2014. Under Road Exploration Technology using GPR, Korea Society of Road Technical Articles, Vol. 16, No. 3. 11-16.
- Changmiao Duan, Renbiao Wu, and Jiaxue Liu. 2011. Estimation of airfield pavement void thickness using GPR, 2011 3rd International Asia-Pacific Conference, 1-4.
- D. J. Daniels, 1996. Surface Penetrating Radar, The Institution of Electrical Engineers, Vol. 8, No. 4. 165-182.
- John M. Reynolds, 1997. Introduction to Applied and Environmental Geophysics.
- Kim, I. S., Lee, K. H., 2001. Thickness Measurement Using Ground Penetrating Radar Package, Korea Pavement Engineering Technical articles, Vol.3, No.2, 41-44.
- Kong, H. J., Kim S. D., Kim, M. J., Han S. H., 2012. A Preprocessing Method for Ground-Penetrating-Radar based Land-mine Detection System, Vol. 50, No. 4. 931-941.
- Seoul Metropolitan Government, 2005. Manual for Management Policy of Road Collapse.
- Son, S. J., Shin, B. C., 2000. Detectability Measurement of GPR for Buried Target in Self-Designed Test Field, Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 20, No. 4, 322-328.