

GPR의 매설물 검출능력 측정에 관한 연구 A Study on Detachability Measurement to Buried Target of GPR

문두열* · 이용희** · 신병철***

Mun, Du Yeoul · Lee, Yung Hee · Shin, Byoung Chul

요 旨

최근 산업의 발달로 도시가 확장되고 건설현장이 대형화됨에 따라 지하 시설물에 대한 정보가 필수적이다. 이 논문에서는 730 MHz의 고정 주파수를 방사하는 3소자 안테나 방식의 GPR을 이용하여 자체 제작한 시험장 속에 매설된 다양한 시험편의 검출능력을 조사하였다. 여러 가지 상황에 대한 검출능력을 알아보기 위하여 매설물의 재질, 크기, 매설 깊이에 차이를 두어 실험을 수행하였다. 레이더파의 전파속도를 조절하여, B-scan상의 쌍곡선 패턴의 위치를 실제 매설한 깊이에 정확하게 일치하도록 함으로써 실험결과로부터 얻은 지반에서의 레이더파의 전파속도가 기존 자료와 유사함을 확인하였다.

ABSTRACT

Recently, the industrial development caused the expansion of city and the field of construction is being larged in size. So, information of construction buried in underground is necessary. In this paper, we were investigated the detachability on various specimen in self-designed test field using the GPR system with three antenna elements and it was constantly radiated 730 MHz frequency. To examine the detachability on various condition, the test were displayed B-scan CRT. And the pattern was exactly positioned when it was compared to the real buried-depth. Therefore, we can confirm similarity between the wave-propagation velocity and previous results.

1. 서 론

최근 지반을 대상으로 하는 건설공사의 규모가 대형화되고 있고, 대상 심도도 증가됨에 따라, 지반에 대한 정보의 중요성이 증가하고 있는 추세이다. 도심 공사 현장의 경우, 복잡하고, 불규칙하게 매설된 상하수도관, 가스관 등과 같은 지하 공공 시설물들이 시공상 장애 요인으로 작용함에 따라 이들 지하 매설물들에 대한 정확한 정보의 파악도 중요한 시공 과정의 일부로 간주되고 있다. 지하 레이더(GPR: Ground Penetration Radar)탐사는 재래의 전자 탐사법이 전자기 유도현상을 이용하는데 반해 전자파를 이용함으로써 건설 분야뿐만 아니라, 수요가 많은 자원의 탐사, 특정 폐기물의 안전한 폐기장소 선정, 선조 들의 유적지 발굴 등을 통하여 그 활용이 증가하고 있는 추세이다.¹⁾ 이러한 레이더 탐사법의 가장 큰 장점

은 사용이 간편하고, 분해능이 높은 비파괴 탐사법이며 또한 영상을 연속적으로 얻을 수 있어 정보를 신속하고 경제적으로 얻을 수 있으며, 매우 높은 고주파를 사용하기 때문에 전자기적 잡음에도 강하다는 것이다.²⁾ 본 연구에서는 표준 시험장을 조성하여 장비의 교정 및 심도에 따른 고주파 레이더의 검출능을 구하고자 하였으며, 금속뿐만 아니라 비금속 매설물들의 탐사가능도, 그리고 동일 매질 내 동일 재질로부터의 반사 신호 크기를 비교해 보고자 하였다.

2. 이론적 배경

2.1 레이더 이미징 원리

레이더는 원래 1940년대 이후 미국에서 적의 비행기나 군함 등의 탐지를 위해 군사적 분야에서 처음 사용되었고 현재는 군사용뿐만 아니라 항공분야를 비롯해 여러 분야에서 광범위하게 사용되고 있는데 이러한 레이더를 지상이 아닌 지하에 적용시켜 지하의 대상물을 탐지하는 것을 지하 레이더 탐사법이라 한다.³⁾ 즉 고주파의 전자

*동의대학교 공과대학 토목공학과 교수

**양산대학 토목과 조교수

***동의대학교 공과대학 신소재공학과 조교수

기파를 지표와 접한 송신안테나를 통해 지하로 방사시키고, 지하 하부의 매질물에 부딪혀 반사되는 전파를 수신안테나에서 pulse 전압으로 바꿔 모니터(CRT)상에 반응 이미지를 나타냄으로써 탐사내용을 해석할 수 있게 하는 전자탐사의 일종이다.⁴⁾ 구체적으로, 모니터상의 반응이미지인 매질물에 대한 응답이 쌍곡선 패턴을 이루는 것은 안테나 시스템의 지표면상의 위치마다 안테나에서 매질물을 바라보는 직선거리와 관련이 있다. 매질 파이프의 수직 위 지점에 안테나 시스템이 위치하면 펄스가 가장 빨리 도달하게 되고, 이 위치에서 수평으로 계속 이동시킬 때마다 안테나에서 매질물을 바라보는 직선 거리가 길어지므로 시간상으로 지연된 응답이 나타나게 된다. 따라서 안테나 시스템을 수평으로 이동시키면서 측정된 자료를 수평 이동거리에 대한 시간영역 펄스로 표현하면 매질물에 대한 응답은 쌍곡선 패턴을 형성한다.

실제 적용에 있어서는 지하구조 내가 매우 불균질한 매질이기 때문에 매우 정밀한 자료처리 및 해석기법을 필요로 한다.⁵⁾ 레이더 탐사에서 수신신호의 크기는 전도도, 유전율, 매질물의 크기 및 형상, 반사경계에서의 불연속의 정도에 의존하고, 기공·공동 같은 불연속의 절연경계 역시 pulse echo를 높이는 요인이 된다.⁶⁾ 또한 이러한 지반조건 외에도 사용 안테나의 중심주파수 등이 탐사결과에 영향을 미친다.

2.2 레이더 전파이론

그림 1은 안테나를 통해 지하로 방사된 레이더파가 매질물에 부딪혀 반사되어 수신안테나에 기록되고, 기록된 파형이 종합 분석되어 모니터의 X축(탐사진행거리)-Y축(심도 : 레이더파의 진행거리)에 이미지를 나타냄으로써 탐지내용을 해석할 수 있게 하는 기본 원리도를 간단하게 도식적으로 나타내었다.

탐사지표로부터 반사물까지의 거리(D)는 송신시각으로

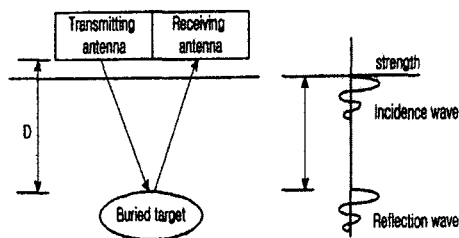


그림 1. 지하 레이더의 원리

부터 수신시각까지의 시간차(Δt) 측정치와 매질 내 레이더파의 속도(v)로부터 식 (2-1)에 의해 구할 수 있다.

$$D = \frac{1}{2} \cdot v \cdot \Delta t \quad (2-1)$$

v : 레이더파의 속도[m/ns]

Δt : 2D를 전자파가 진행하는데 걸린 시간[ns]

여기서, 레이더파의 속도 v는 유전율의 함수로서 식 (2-2)와 같다.

$$v = \frac{0.3}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad [\text{m/ns}] \quad (2-2)$$

ϵ_r : 매질의 상대유전율

μ_r : 매질의 상대투과율

탐사결과는 전자기파가 지하의 어떤 두 매질의 경계에서 반사되어 돌아온 신호를 받아 지하 지질구조를 영상화하게 되는데, 이렇게 두 매질 사이에서 반사가 일어나려면 두 매질의 고유임피던스의 차이가 커야 한다. 그런데 고유임피던스는 상대유전율과 상대투과율, 전기전도도에 의해 결정되며,⁷⁾ 지하에서의 레이더파의 전파에 영향을 미치는 지하 매질의 전기적 특성으로부터 감소요인은 대략 다음 3가지 정도로 요약된다. 우선, 레이더 탐사에서 사용하는 송신 안테나는 점원(point source)이므로 송신원에서 90°의 원뿔 형태로 전파한다. 따라서 송신안테나로부터 거리가 증가함에 따라 신호의 크기는 1/r의 비율로 감소한다(geometrical spreading). 또한 감쇠상수에 의하여 에너지의 일부가 열로 변환되면서 신호의 크기가 감소하는데, 이는 흡수계수라고도 한다. 레이더 탐사에서 사용하는 10 MHz 이상의 고주파 대역은 전파영역에 속하며, 전파영역에서 감쇠상수는

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad [\text{dB/m}] \quad (2-3)$$

σ : 대상물의 도전율[S/m]

ϵ : 대상물의 유전율[F/m]

μ : 대상물의 투과율[H/m]

로 정의되고, 매질의 전도도가 클수록, 유전율이 작을수록 감쇠가 심하며, 주파수에는 무관하다. 또한 침투심도는

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \frac{2}{\sigma} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \quad [\text{m}] \quad \text{가 된다. 때문에 GPR탐사에서 탐사심}$$

도는 대상물의 전기적·유전율적 성질에 크게 의존한다. 마지막으로, 경계면에서 발생하는 레이다파의 반사 및 투과에 의한 에너지 손실이 있으며 수직입사에 대한 반사 계수는

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_2} - \sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_1}} \quad (2-4)$$

ϵ_2, ϵ_1 : 경계면 양쪽에서의 상대유전율

한편, 레이다파의 파장은

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{300}{f\sqrt{\epsilon_r}} \text{ [m]} \quad (2-5)$$

ϵ_r : 상대 유전율[ϵ/ϵ_0]

f: 중심 주파 수[MHz]

v: 레이다파의 속도[m/ns]

이며, 분해능은 파장의 1/4로, 분해능을 향상시키기 위해서는 중심주파수가 높아야 한다.

레이다파의 속도는 매질의 유전율이 함수이므로, 분해능은 매질에 따라 달라진다. 또, 중심주파수가 높아지면

분해능은 향상되지만, 레이다파의 감쇠가 커져서 탐사심도가 작아진다.⁸⁾

표 1은 각 매질별 전기적 물성 및 전자파 전파속도를 나타내고 있으며, 표내 이러한 요소는 GPR탐사에서 탐사심도가 전기적·유전율적 성질에 크게 의존하여 다양한 깊이에서 얼마나 작은 대상물까지 탐지할 수 있는가를 결정하는 중요한 요인들이다.

3. 실 험

3.1 매설물 및 시험장 제작

여러 가지 상황에 대한 검출능력을 실험하기 위해 몇 가지 매설조건을 달리한 시험장을 자체 제작하였다. 고주파 레이다에서 재질이 다른 매설물의 검출능력을 알아보기 위해 그림 2와 같이 다양한 종류의 매설물(강관, PVC, 콘크리트 공시체 등을 표 2와 같이 일련의 번호를 부여하여 매설하였고, 동일한 물체에 대하여 매설된 깊이가 다른 경우의 검출능력을 조사하기 위하여 그림 3과 같이 0.5 m, 1.5 m, 2 m 매설깊이에 일련의 번호와 같이

표 1. 매질에 따른 전기적 특성값 및 전자파의 속도

| 매질 | 유전상수 (K) | 전파속도 (m/ns) | 전기전도도 (mS/n) |
|------------|----------|-------------|--------------|
| 공기 | 1 | 0.3 | 10^{-8} |
| 맑은 물 | 80 | 0.033 | 0.01 |
| 흐린 물 | 80 | 0.033 | 0.5 |
| 해수 | 80 | 0.01 | 5000 |
| 얼음 | 3~4 | 0.16 | 100 |
| 화강암 | 5 | 0.13 | 0.01~1 |
| 석회암 | 4~8 | 0.12 | 0.5~2 |
| 세일 | 5~15 | 0.09 | 1~100 |
| 실트 | 5~30 | 0.07 | 1~100 |
| 점토 | 5~40 | 0.06 | 2~1000 |
| 휘발유 | 1.94 | 0.22 | 10^{-7} |
| 실트질 점토 | 6 | 0.12 | 6.6 |
| 모래(포화) | 20~30 | 0.06 | 0.1~1 |
| 모래(건조) | 3~5 | 0.15 | 0.01 |
| 암염 | 5~6 | 0.13 | 0.01~1 |
| 사암 | 6 | 0.12 | 0.125~1 |
| 콘크리트 | 4~10 | 0.1 0.11 | 0.00015 |
| PVC | 3.3 | 0.16 | 1.34 |
| Fiberglass | 4.8 | 0.14 | 0.66 |
| Metel | 300 | 0.017 | 10^{10} |
| 매탄을 | 32.6 | 0.052 | 34 |

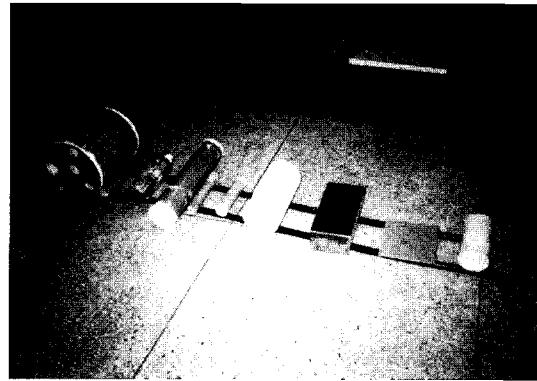
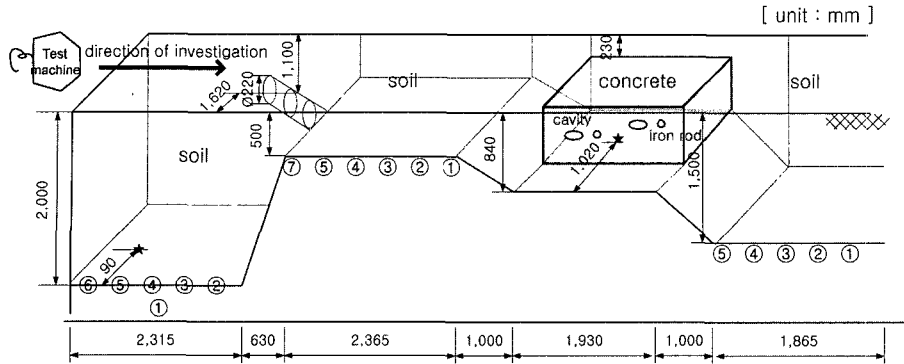


그림 2. 매설 시험편의 종류

표 2. 매설된 시험편의 종류

| No. | 재질 | 크기 (mm) | 내용 | 실제대상 |
|-----|----------|------------|-------|------|
| ① | 강관 | ∅267 | empty | 가스관 |
| ② | PET 병 | 80×250×80 | water | · |
| ③ | PVC pipe | ∅115 | empty | 하수관 |
| ④ | 강관 | ∅51 | empty | 하수관 |
| ⑤ | 콘크리트 공시체 | ∅152 | · | · |
| ⑥ | 나무박스 | 150×300×90 | bone | 박스 |
| ⑦ | 강철판 | 200×200×8 | · | · |
| ⑧ | 콘크리트 공시체 | ∅102 | · | · |



- ★ specimen core, mold core
- gab between specimens : 300mm, buried depth : criterion of specimen surface

그림 3. 자체 시험장의 상세도

매설하였다. 또, 동일 재질이면서 굵기가 다른 파이프가 존재하는 경우 신호 세기의 변화를 보기 위하여 각 매설물 셋트에는 직경이 다른 강관(Ø267 mm, Ø152 mm)을 포함시켰다. 또한 콘크리트 속의 철근 및 공극의 검출능, 분해능 및 철근 굵기에 따른 신호변화를 보기 위하여, 그림 4와 같이 거푸집 속에 굵기가 다른 철근을 약 10 cm 간격으로 고정시켜서 거푸집 바닥이 매설심도 1 m 위치에 놓이도록 매설하였다. 매설심도 0.5 m, 1.5 m, 2 m 영역은 마른 모래를 채우고, 거푸집은 콘크리트로 채운 뒤, 각 매설부 표면으로부터 약 25 cm 두께의 콘크리트를 덮어서 시험장을 마무리하였다. 그림 3은 자체 제작한 시험장의 상세도이며, 실제로 매설 시험편들을 아래 번호와 같이 매설심도만을 달리하여 매설하였다. 매설심도별로 표시되어 있는 시험편들은 실제 매설탐사 대

상물인 가스관이나 하수관 등을 고려하여 선정하였다. 매설심도 0.5 m 영역아래 1 m 지점에는 시험 후 확인 굴착시 발견된 Ø220 mm 강관이 탐사진행방향으로부터 약 135° 기울기로 위치하고 있었다.

3.2 실험장비 및 방법

실험은 그림 5의 Mitsui engineering & Shipbuilding Co., LTD (MES)의 지중 레이더(GPR)탐사 장비(model UG-V33)를 사용하였다. UG-V33의 system은 짧은 펄스 신호를 송신 안테나에 의해 결정된 중앙 주파수($f_c = 730 \text{ MHz}$)로 방사하는 Impulse 방식의 3소자 안테나 타입이다.⁹⁾

탐사전 효율적인 레이더파의 송수신을 위하여, 검사대상물(표준시험장)의 표면을 전처리 하였고, 탐사는 지중

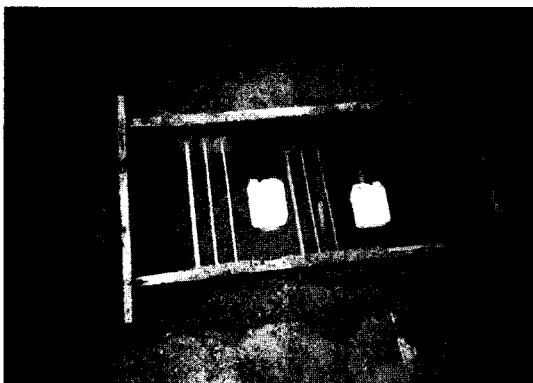


그림 4. 콘크리트속의 강철봉과 공극



그림 5. GPR탐사기(모델 UG-V33)

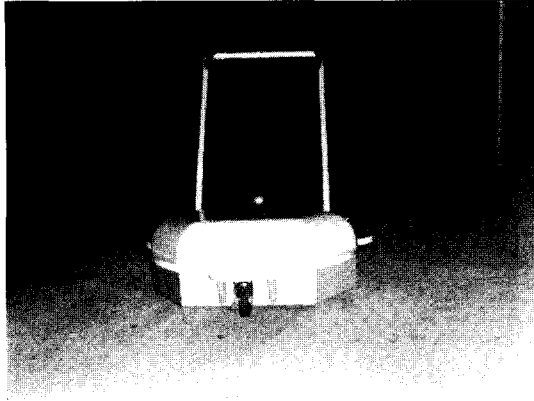


그림 6. 시험장에서의 GPR 탐사



그림 7. 전파의 속도 9[cm/ns]일 때의 결과

레이다 탐사장비의 탐사진행방향과 매설물들의 매설방향이 직교하도록 그림 2와 같이 수행했으며, 신호처리부의 모니터를 통해 그림 7과 같이 수직단면화상표시(B-mode)의 탐사내용을 실시간으로 해석하였다.

4. 결과 및 고찰

전파의 속도에 따른 패턴의 형상을 알아보기 위해 임의의 전파의 속도 9[cm/ns]로 하여 측정된 결과 그림 7의 결과를 나타내었다. 이는 기존의 0.5 m 지점에 매설된 물체들이 0.3 m 지점에 있는 것으로 인식되어 실제의 심도와의 차이를 확인할 수 있었다. 그리하여 본 실험에서는 레이더파의 전파속도를 결정함에 있어서 역으로 매설심도 0.5 m에 위치하도록 전파속도를 조절함으로써 레이더파의 전파속도[16 cm/ns]를 결정하였고 측정된 결과

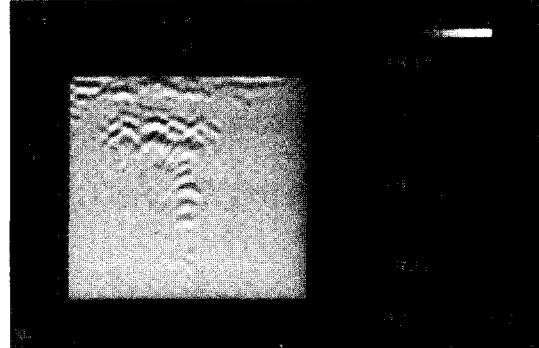


그림 8. 전파의 속도 16[cm/ns]일 때의 결과

그림 8과 같은 결과를 나타내었으며, 이는 표 1에서의 기준에 값[0.15 cm/ns]와 유사함을 확인하였다.

730 MHz의 고주파 레이더에 있어 동일한 물체에 대하여 매설된 깊이가 다른 경우의 검출능을 측정하기 위해 매설심도(0.5 m, 1.5 m, 2 m)에 변화를 주어 시험한 결과, 매설심도 0.5 m soil영역만 신호처리부의 CRT화면상에 쌍곡선 패턴의 이미지 변화를 나타내었으며, 매설심도 0.5 m 영역 내의 매설물 중에서도 금속류(강관, 강철판)와 PVC pipe만 탐지되었고, 시험장 제작시 매설심도 0.5 m 영역아래 1 m 지점에 탐사진행방향으로부터 135° 기울기로 지나가던 강관(Ø220 mm)이 CRT상의 쌍곡선 패턴의 이미지 변화로서 나타났다.

동일 재질이면서 굵기가 다른 파이프가 존재하는 경우의 신호 세기의 변화를 보기 위하여 매설물 set내에 포함시켰던 직경이 다른 강관(Ø267 mm, Ø152 mm)에 대해서는 신호의 세기나 쌍곡선 패턴의 모양에 별 차이가 없었다.

콘크리트 속의 철근 및 공극의 검출능, 분해능 및 철근 굵기에 따른 신호변화를 보기 위하여, 거푸집 속에 굵기가 다른 철근을 약 10 cm간격으로 고정시켜서 거푸집 바닥에 매설심도 1 m 위치에 놓이도록 매설하였던 것에 대해서는 CRT상의 이미지 변화를 보이지 않아 그 영향을 알 수 없었다. 주로 고주파 대역의 안테나를 이용한 콘크리트 탐사에서는 전자파의 심한 감쇠로 인하여 두께 20 cm 내외에 가능한 콘크리트의 입도가 균질하여야 할 것이다.

그림 9은 임의의 출발선으로부터 미리 표시해 두었던 각 매설 시험편까지의 거리를 보여주고 있다. 즉 심도 0.5 m 지점에 거리 방향으로 4개의 쌍곡선 패턴은 출발

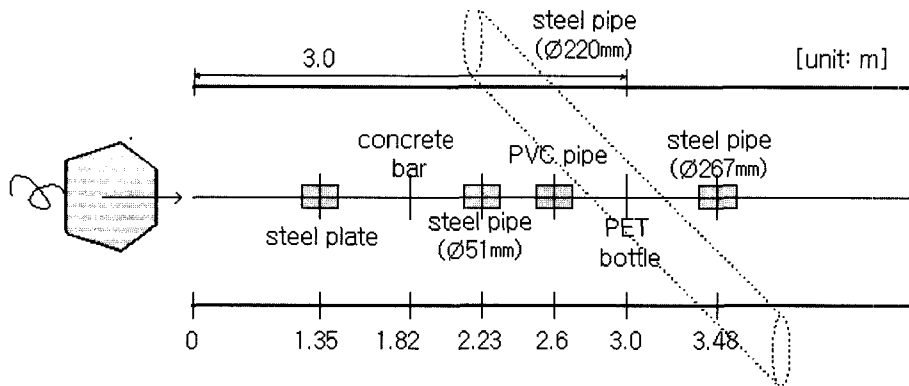


그림 9. 실험에 의한 시험장의 상태

표 3. 매설 심도와 수평거리의 오차

| No. | 재료 | 매설심도(m) | 탐사심도(m) | 매설거리(m) | 탐사거리(m) | 심도오차(m) | 수평오차(m) |
|-----|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| ① | 강관 | 0.50 | 0.50 | 5.32 | 5.25 | 0.00 | 0.07 |
| ③ | PVC 관 | 0.50 | 0.49 | 4.32 | 4.37 | 0.01 | 0.05 |
| ④ | 강관 | 0.50 | 0.49 | 3.82 | 4.00 | 0.01 | 0.18 |
| ⑦ | 강관 | 0.50 | 0.46 | 2.95 | 3.12 | 0.04 | 0.17 |

선으로부터 각 매설 시험편까지의 거리를 비교할 때 강철판, 강관(Ø51mm), PVC 관, 강관(Ø267mm)인 것으로 확인되고, 심도 1m 지점의 이미지 변화는 의도하지 않았던 135° 기울기로 지나가던 강관(Ø220mm)이며, 심도 약 0.2~0.25m에 걸친 이미지 변화는 25cm 두께로 덮였던 시멘트로부터의 변화이다.

5. 결 론

본 논문에서는 장비의 교정을 위한 표준시험장에 매설된 심도가 다른 다양한 시험편에 대한 탐사결과를 보고자 하였으며, 재질에 따라 매설물의 탐사 가능도를 가능하고, 동일 매질내 굽기가 다른 동일 재질의 반사체로부터의 반사신호의 크기변화 및 분해능을 시험하고자 하였다.

1. 매설심도 0.5m 지점에서의 금속류 및 PVC파이프, 1m 지점의 135° 기울기를 갖는 강관 만이 탐사됨에 따라 흙을 매질로 하는 730MHz주파수대역의 GPR탐사는 심도 1m 안팎의 탐사에 적합하다.

2. 이상의 매설 심도에서 강관, PVC 파이프의 수평면 상 위치 오차는 최대 18cm였고, 깊이 방향에서 오는 오

차는 전파속도의 변수로써(임의의 전파속도와 역으로 CRT의 신호가 0.5m에 위치하도록 전파속도를 조절함으로써 얻은 레이더파의 전파 속도는 표 1과 유사함을 확인), 표 1과 같이 매질에 따른 적절한 레이더파의 전파 속도치를 선택하여 초기 설정치로 프로그램 상에 입력함으로써 비교적 정확하게 측정 가능하다.

3. 동일 재질이면서 굽기가 다른 파이프가 존재하는 경우의 신호변화는 쌍곡선 패턴의 모양에서 별 차이가 없어 확인할 수가 없었다.

4. 레이더파의 파장으로부터의 분해능에 따른 시험편 간의 거리를 보면, 흙의 영역에서는 5.48cm로 실제 시험장 조성시 매설 시험편간 거리를 30cm씩 두었던 것을 고려하면 매설 시험편의 반사 신호로부터의 신호처리의 분리에 따른 분해능에 영향을 미칠 수 없음을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정, 부산광역시 지원 지역협력연구센터인 동의대학교 전자세라믹스연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. Jonathon C. Ralston, David W. Hainsworth, "Application of Ground Penetration Radar for Coal Depth Measurement", Signal Processing Society, 1999 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP99., 1999, pp. 2275-2278.
2. 현승엽, 김상욱, 김세윤, "자체 설계한 안테나로 구성된 GPR의 파이프 검출능력에 관한 측정", 대한 전자 공학회 논문집, 제36권, 1999, pp. 19-26.
3. Satoshi Maekawa, Thomas J.F., "Study of Cavity Estimation Behind Concrete Tunnel Lining Using GPR", 4th International Conference on Ground Penetration Radar, 1995, pp. 895-905.
4. Kanji Murasawa, Hiroshi Nishizaki, Chihiro Jyomuta, Noriaki Kimura, "Subsurface Radar with Three Antenna Elements Based on Scattering Theory", Mitsui Engineering & Shipbuilding Co. LTD, Technical Report of MESG, 1998, pp. 20-28.
5. 동부건설(주) 기술연구소, "지하레이다(GPR)를 이용한 지하매설물 조사보고서", 1996, pp. 2-13.
6. 손호웅 등, "지반환경물리탐사", 초판, 시그마프레스, 1999, pp. 583-648.
7. 윤운상, 배성호, 김병철, 김학수, "전도성 층적지반의 지질 및 하부 기반암 조사를 위한 지하레이다(GPR)의 적용", 한국암반공학회, Vol. 5, 1995, pp. 114-122.
8. 한국 콘크리트학회 편, "콘크리트 구조물의 비파괴 검사 및 안전진단", 한국콘크리트학회, 1995, pp. 155-172.
9. 이종득, "콘크리트 구조물의 비파괴 검사", 1996, pp. 85-91.

(2001년 7월 31일 원고접수)