

자체 제작한 시험장에서의 GPR의 매설물 검출능력에 관한 측정

Detectability Measurement of GPR for Buried Target in Self-Designed Test Field

손수정*, 신병철*

Soo-Jung Son* and Byoung-Chul Shin*

초 록 730MHz의 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 위치하게 함으로써, 실험결과로부터 얻은 soil(dry)에서의 레이더파의 전파속도가 기존 data와 유사함을 확인하였다.

주요용어: 지중 레이더 탐사, 자체 제작한 시험장, 매설시험편, 3소자 안테나 방식, 수직단면화상, 쌍곡선 패턴

Abstract In this paper, we were investigated the detectability on various specimen in self-designed test field using the GPR system with three antenna elements. The GPR system was constantly radiated 730MHz frequency. To examine the detectability on various condition, the test were experimented using different materials, size and buried depth.

As an adjusted wave-propagation velocity, the location of hyperbolic curve pattern 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.

Keywords: ground penetration radar(GPR) testing, self-designed test field, buried targets, radar system with three antenna elements, B-scan, hyperbolic curve pattern

1. 서 론

최근 기반을 대상으로 하는 건설공사의 규모가 대형화되고 있고, 대상심도도 증가됨에 따라, 지반에 대한 각종 정보의 중요성과 필요성이 증가하고 있는 추세이다. 도심의 공사 현장의 경우, 불규칙하게 매설된 상수도관, 가스관 등과 같은 지하 공공시설물들이 시공상 장애요인으로 작용함에 따라, 이들 지하매설물에 대한 보다 정확한 정보의 파악이 매우 중요시되고 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위한 수단으로 다양한 장비들과 기법

들이 사용되고 있으며 그 중에서도 물리탐사기술을 응용한 지하레이더 탐사기법이 주목을 받고 있다. 지하레이더(GPR: Ground Penetration Radar)탐사는 건설 분야뿐만 아니라, 수요가 많은 자원의 탐사, 특정 폐기물의 안전한 폐기장소 선정, 선조들의 유적지 발굴 등을 통하여 그 활용이 증가하고 있는 추세이다. 이러한 레이더 탐사법의 가장 큰 장점은 사용이 간편하고, 분해능이 높은 비파괴 탐사법이며, 매우 높은 고주파를 사용하기 때문에 전자적 잡음에도 강하다는 것이다.

본 논문에서는 자체 제작한 시험장을 통하여 장비의

교정 및 심도에 따른 고주파 레이더의 검출능을 알아보고자 하였으며, 금속뿐만 아니라 비금속 매질물들의 탐사가능도, 그리고 동일 매질내 동일 재질로부터의 반사신호 크기를 비교해 보고자 하였다.

2. 이론적 배경

2.1. 레이더 이미징 원리

지하레이더(GPR)탐사는 고주파의 전자파(pulse wave)를 지표와 접한 송신안테나를 통해 지하로 방사시키고, 지하 하부의 매질물에 부딪혀 반사되는 전파를 수신안테나에서 pulse 전압으로 바꿔 모니터(CRT)상에 반응이미지를 나타냄으로써 탐사내용을 해석할 수 있게 하는 전자탐사의 일종이다[1]. 구체적으로, 모니터(CRT)상의 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 직선거리가 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[2].

실제 적용에 있어서는 지하 구조 내가 매우 불균질한 매질이기 때문에 매우 정밀한 자료처리 및 해석기법을 필요로 한다. 레이더탐사에서 수신신호의 크기는 전도도, 유전율, 매질물의 크기 및 형상, 반사경계에서의 불연속의 정도에 의존하고, 가공·공동 같은 불연속의 절연경계 역시 pulse echo를 높이는 요인이 된다. 또한 이러한 지반조건 외에도 사용안테나의 중심주파수 등이 탐사결과에 영향을 미친다[3-6].

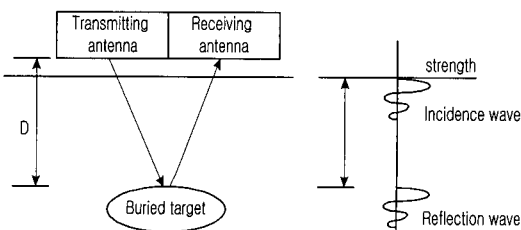


Fig. 1 Principle of subsurface radar

2.2. 레이더파의 전파이론

Fig. 1은 송신안테나를 통해 지하로 방사된 레이더파가 매질물에 부딪혀 반사되어 수신안테나에 기록되고, 기록된 파형이 종합 분석되어 모니터(CRT)의 x축(탐사진행거리)-y축(심도: 레이더파의 진행거리)에 이미지를 나타냄으로써 탐지내용을 해석할 수 있게 하는 기본 원리도를 간단하게 도식적으로 나타내었다[4].

탐사지표로부터 반사물체까지의 거리(D)는 송신시각으로부터 수신시각까지의 시간차(Δt)의 측정치와 매질내 레이더파의 속도(v)로부터 식 (1)에 의해 구할 수 있다.

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

v : 레이더파의 속도 [m/ns]
 Δt : 2D를 전자파가 진행하는데 걸린 시간 [ns]

여기서, 레이더파의 속도 v 는 유전율의 함수로서 식 (2)와 같다.

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

ϵ_r : 매질의 상대유전율
 μ_r : 매질의 상대투자율

탐사결과에는 주로 유전상수, 전기전도도와 같은 지반구성물질의 전기적 특성에 크게 영향을 받는다. 이러한 전기적 특성으로부터 유도되는 임피던스 차에 의하여 반사가 일어나게 되며, 지하에서의 레이더파의 전파에 영향을 미치는 지하 매질의 전기적 특성으로부터 감쇠요인은 대략 다음 3가지 정도로 요약된다.

우선, 레이더탐사에서 사용하는 송신 안테나는 점원(point source)이므로 송신원에서 90°의 원뿔(cone) 형태로 전파한다. 따라서 송신안테나로부터 거리가 증가함에 따라 신호의 크기는 $1/r$ 의 비율로 감소한다(geometrical spreading). 또한 감쇠상수에 의하여 에너지의 일부가 열로 변환되면서 신호의 크기가 감소하는데, 이는 흡수계수라고도 한다. 레이더 탐사에서 사용하는 10MHz 이상의 고주파 대역은 전파영역에 속하며, 전파영역에서 감쇠상수는

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

σ : 대상물의 도전율 [S/m]
 ϵ : 대상물의 유전율 [F/m]
 μ : 대상물의 투자율 [H/m]

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

$$\text{또한 침투심도는 } \delta \approx \frac{1}{\alpha} \approx \frac{2}{\sigma} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \quad [\text{m}] \text{ 가}$$

된다. 때문에 지하레이다(GPR) 탐사에서 탐사심도는 대상물의 전기적·유전율적 성질에 크게 의존한다.

마지막으로, 경계면에서 발생하는 레이더파의 반사 및 투과에 의한 에너지 손실이 있으며 수직입사에 대한 반사 계수는

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

Table 3 Electrical property and propagation rate for each medium

매질	유전상수(K)	전파속도(m/ns)	전기전도도(mS/m)
공기	1	0.3	10^{-8}
맑은 물	80	0.033	0.01
흐린 물	80	0.033	0.5
해수	80	0.01	5,000
얼음	3~4	0.16	100
화강암	5	0.13	0.01~1
석회암	4~8	0.12	0.5~2
셰일	5~15	0.09	1~100
실트	5~30	0.07	1~100
점토	5~40	0.06	2~1,000
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}
휘발유	1.94	0.22	10^{-7}
매탄올	32.6	0.052	34

ϵ_2, ϵ_1 : 경계면 양쪽에서의 상대유전율

로 표현된다.

한편, 레이더파의 파장은

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{300}{f\sqrt{\epsilon_r}} \quad [\text{m}]$$

ϵ_r : 상대유전율 [$=\epsilon/\epsilon_0$]
 f : 중심 주파수 [MHz]
 v : 레이더파의 속도 [m/ns]

이며, 분해능은 파장의 1/4로, 분해능을 향상시키기 위해서는 중심주파수가 높아야 한다[6].

레이더파의 속도는 매질의 유전율의 함수이므로, 분해능은 매질에 따라 달라진다. 또, 중심주파수가 높아지면 분해능은 향상되지만, 레이더파의 감쇠가 커져 가탐심도가 작아진다.

Table 1은 각 매질별 전기적 물성 및 전자파 전파속도를 나타내고 있으며, Table내 이러한 factor는 GPR 탐사에서 탐사심도가 전기적·유전율적 성질에 크게 의존하여 다양한 깊이에서 얼마나 작은 대상물까지 탐지할 수 있는가를 결정하게 하는 중요한 요인들이다.

본 실험에서는 미리 선정한 매질깊이에 매질물들을 놓고, 그로부터 지표까지는 도전성이 낮은 마른 모래를 채웠다.

2.3. 3소자 안테나 방식의 레이더 센서

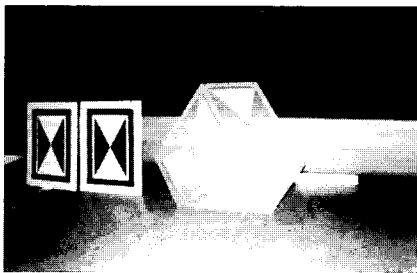
지금까지의 대부분의 radar sensor는 Fig. 2(b) former radar system에서와 같이 안테나 진행방향과 매질물의 매질방향이 평행한 pipe A는 탐지가 어렵고, 진행방향으로부터 매질방향이 직교에 가까울수록 반사신호가 커져 탐사가 가능했던 2소자 안테나 방식이었다[7].

그러나, 본 실험에서의 3소자 안테나 방식은 3개의 안테나 소자가 120° 회전 대칭을 이루고 있기 때문에 각 안테나 소자는 전파의 누설이 없으므로, Fig. 2(b) UG-V33 Radar System에서와 같이 매질방향에 관계없이 pipe A, B의 탐지가 가능하다[8]. Fig. 2(a)는 기존의 2소자 레이더 안테나와 새로운 방식인 3소자 레이더 안테나를 보여주고 있다.

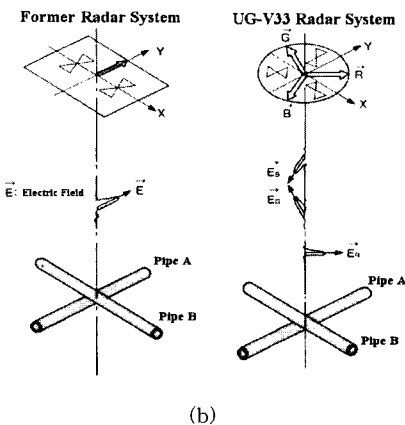
3. 실험

3.1. 매설물 및 시험장 제작

여러 가지 상황에 대한 검출능력을 실험하기 위해 몇 가지 매설조건을 달리한 시험장을 자체 제작하였다. 고주파 레이더에 대한 재질이 다른 매설물의 검출능력을 알아보기 위해 Fig. 4(a)와 같이 다양한 종류의 매설물 (steel pipe, PVC, concrete 공시체...)을 매설하였고, 동일한 물체에 대하여 매설된 깊이가 다른 경우의 검출능을 조사하기 위하여 Fig. 3과 같이 0.5m, 1.5m, 2m 매설깊이에 Fig. 4(a)의 매설물 set를 각각 매설하였다. 또, 동일 재질이면서 굵기가 다른 파이프가 존재하는 경우 신호 세기의 변화를 보기 위하여 각 매설물 set에는 직경이 다른 steel pipe ($\phi 267\text{mm}$, $\phi 152\text{mm}$)를 포함시켰다.



(a)



(b)

Fig. 2 (a) Radar sensor with three antenna elements system
(b) Concept figures of measuring system

콘크리트 속의 철근 및 void의 검출능, 분해능 및 철근 굵기에 따른 신호변화를 보기 위하여, 거푸집 속에 굵기가 다른 철근을 약 10cm 간격으로 고정시켜서 거푸집 바닥이 매설심도 1m 위치에 놓이도록 매설하였다. 매설심도 0.5m, 1.5m, 2m영역은 마른 모래로, 거푸집은 concrete로 채운 뒤, 각 매설부 표면으로부터 약 25cm두께의 시멘트를 덮어서 시험장을 마무리하였다.

Fig. 3은 자체 제작한 시험장의 상세도이며, 실제로 매설시험편들이 이와 같은 순으로 매설심도만을 달리하여 매설되었고, 매설심도 0.5m soil 영역 아래 1m 지점에는 의도하지 않았던 $\phi 220\text{mm}$ steel pipe가 탐사진행방향으로부터 약 135° 기울기로 위치하고 있었다. 매설심도별로 표시되어 있는 시험편들은 Table 2의 materials와 같으며, 이들 시험편들은 실제 매설탐사 대상물인 gas pipe나 sewer pipe 등을 고려하여 선정하였다.

Fig. 4(a)가 Table 2의 No. 순으로 나열한 시험편들이며, (b)는 거푸집 속에 콘크리트를 채우기 직전의 모습으로 약 10cm 간격의 굵기가 다른 2set의 철근을 거푸집 속에 매설심도가 다르도록 고정 시켰으며, void를 가정한 플라스틱 볼통을 2set의 철근과 같은 깊이로 고정하여 놓았다.

3.2. 실험장비 및 방법

실험은 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 중심 주파수($f_c=730\text{MHz}$)로 방사하는 impulse 방식의 3소자 안테나 타입이다.

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

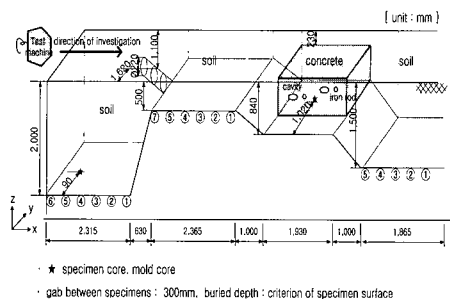


Fig. 3 A detail drawing of test field

레이다 탐상장비의 탐사진행방향과 매설물들의 매설방향이 적교하도록 Fig. 3과 같이 수행했으며, 신호처리부의 모니터를 통해 Fig. 6(c)와 같이 수직단면화상표시(B-mode)의 탐사내용을 실시간으로 해석하였다.

4. 결과 및 고찰

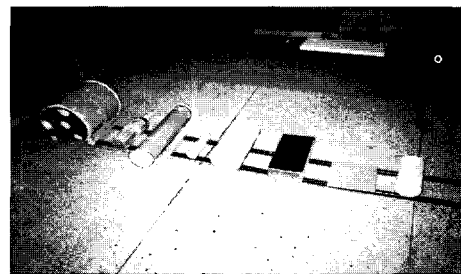
고주파 레이다에 있어 동일한 물체에 대하여 매설된 깊이가 다른 경우의 검출능을 측정하기 위해 매설심도 (0.5m, 1.5m, 2m)에 변화를 주었던 실험의 결과, 매설심도 0.5m soil영역만 신호처리부의 CRT화면상에 쌍곡선 패턴의 이미지 변화를 나타내었다.

매설심도 0.5m soil영역 내의 매설물 중에서도 금속류 (steel pipe, steel plate)와 PVC pipe만 탐지되었으며, 시험장 제작시 매설심도 0.5m soil영역 아래 1m 지점에 탐사진행방향으로부터 135° 기울기로 지나가던 steel pipe (Ø220mm)가 CRT상의 쌍곡선 패턴의 이미지 변화로서 나타났다.

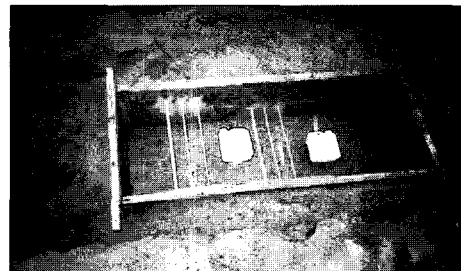
동일 재질이면서 굵기가 다른 파이프가 존재하는 경우의 신호 세기의 변화를 보기 위하여 매설물 set내에 포함시켰던 직경이 다른 steel pipe(Ø267mm, Ø152mm)에 대해서는 신호의 세기나 쌍곡선 패턴의 모양에 별 차이가 없었다.

콘크리트 속의 철근 및 void의 검출능, 분해능 및 철근 굵기에 따른 신호변화를 보기 위하여, 거푸집 속에 굵기가 다른 철근을 약 10cm 간격으로 고정시켜서 거푸집 바닥이 매설심도 1m 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 20cm 내외에 존재하는 공동·철근을 검출할 수 있으며, 측정결과와 판정을 용이하게 하기 위해서는 콘크리트의 질이 가능한한 균질하여야 하고, 측정심도에 따른 철근경 등이 고려되어야 하는 등 실제 시험장 조성상의 한계가 있었다[9-11].



(a)



(b)

Fig. 4 Actual specimen for test
(a) Series of test specimen. (b) Reinforced iron bars and voids in the concrete mold.

Table 2 Replacement of actual materials

No.	materials	size (mm)	state	relation
①	steel pipe	Ø267	empty	gas pipe
②	PET bottle	80×250×80	water	.
③	PVC pipe	Ø115	empty	sewer pipe
④	steel pipe	Ø51	empty	gas pipe
⑤	concrete 공시체	Ø152	.	.
⑥	wood box	150×300×90	bone	casket
⑦	steel plate	200×200×8	.	.
⑧	concrete 공시체	Ø102	.	.



Fig. 5 Ground penetration radar(GPR) machine (model UG-V33)

Fig. 6(a)는 유일하게 CRT상에 이미지 변화를 보였던 매설심도 0.5m soil 영역에 놓였던 시험편의 매설 직전 상태를 보여주고 있으며, (b)는 매설심도 0.5m soil 영역만을 탐사하기 위해 임의로 정한 출발선으로부터 미리 표시해 두었던 각 매설 시험편까지의 거리를 보여주고 있다. (c)는 0.5m soil 영역의 CRT상의 이미지 변화로써, x축은 탐사진행거리[m]이며, y축은 레이다파의 진행거리인 심도[m]이다. y축 심도 0.5m 지점에 x축 방향으로 4개의 쌍곡선 패턴을 보이고 있으며 (b)의 출발선으로부터 각 매설 시험편까지의 거리를 비교할 때, steel plate, steel pipe(Ø51mm), PVC pipe, steel pipe(Ø267mm)인 것으로 고려되고, 심도 1m 지점의 이미지 변화는 의도하지 않았던 135° 기울기로 지나가던 steel pipe(Ø220mm) 일 것으로 추정된다. 그리고 탐사표면으로부터 심도 약 0.2~0.25m 에 걸친 이미지 변화는 시험장 마무리 작업 시 약 25cm 두께로 덮였던 시멘트로부터의 변화이다.

이상의 매설심도 0.5m soil영역에서 변화를 보인 steel pipes, PVC pipe의 수평면상의 위치 오차는 10cm 정도의 범위였으며, 깊이 방향의 오차는 전파속도의 변수로서 Table 1에서와 같은 매질에 따른 적절한 레이다파의 전파속도치를 선택하여 초기 설정치로 프로그램 상에 입력 하므로써 교정이 가능하다.

한편, 본 실험에서는 탐사 매질의 상대유전율에 따른 초기 설정 값인 레이다파의 전파속도를 결정함에 있어서, 역으로 매설심도 0.5m soil영역의 반사체로부터의 신호가 CRT상의 y축인 심도 0.5m에 위치하도록 전파속도를 조절함으로써 soil에서의 레이다파의 전파속도(16.0cm/ns)가 Table 1.에서 표시하고 있는 기존의 값(0.15m/ns)과 유사함을 확인하였다.

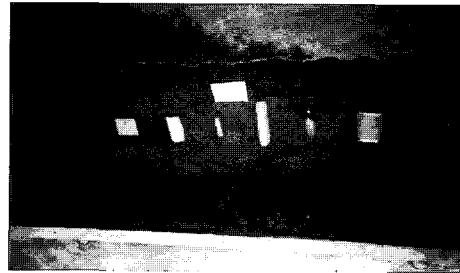
또, 레이다파의 파장으로부터의 분해능에 따른 시험편 간 거리를 보면, soil영역에서는 5.48cm로, 실제 시험장 조성시 매설 시험편간 거리를 30cm씩 두었던 것을 고려하면 매설 시험편의 반사 신호로부터의 신호처리의 분리에 따른 분해능의 영향은 미칠 수 없었음을 알 수 있다.

마찬가지로, concrete 영역에서의 분해능에 따른 시험편간 거리는 3.4cm로 시험장에 매설된 거푸집내 철근간 간격을 고려할 때, 실제로 concrete 내 철근이 탐지되었다면 CRT상의 철근간 신호를 구분하기에는 충분했을 것으로 예상된다.

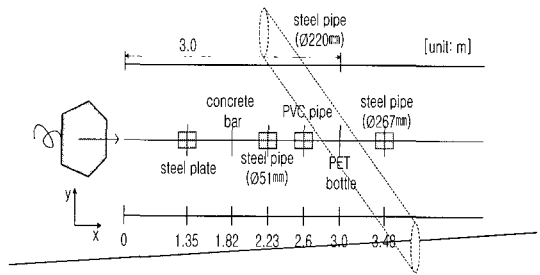
각 탐사매질에 따른 분해능의 유도과정은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{soil 에서의 분해능} &= \lambda \frac{1}{4} = \frac{v}{f} \cdot \frac{1}{4} \\ &= \frac{0.16m/ns}{730MHz} \cdot \frac{1}{4} = 0.0547 \text{ m} \end{aligned}$$

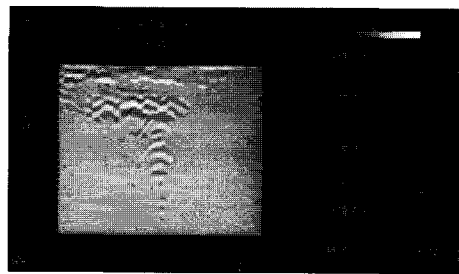
$$\begin{aligned} \text{concrete 에서의 분해능} &= \lambda \frac{1}{4} = \frac{v}{f} \cdot \frac{1}{4} \\ &= \frac{0.1m/ns}{730MHz} \cdot \frac{1}{4} = 0.034 \text{ m} \end{aligned}$$



(a)



(b)



(c)

Fig. 6 (a) Specimen before bury in ground (b) Schematic of test field (c) CRT result

5. 결 론

본 논문에서는 장비의 교정을 위한 표준시험장에 매설된 심도가 다른 다양한 시험편에 대한 탐사 결과를 보고자 하였으며, 금속/비금속 매설물의 검출능에 따른 탐사가능도를 가늠하려 하였고, 동일 매질내 굵기가 다른 동일 재질의 반사체로부터의 반사신호의 크기변화 및 분해능을 시험하고자 하였다.

그 결과 매설심도 0.5m soil 영역의 Steel류 매설 시험편과 PVC pipe 및 1m 깊이에 의도하지 않았던 135° 기울기를 갖는 steel pipe만이 탐사됨에 따라 soil을 매질로 하는 심도 1m 안팎의 steel로부터의 검출이 가장 유리했으며, 0.5m soil 영역에서는 $\phi 5\text{cm}$ 의 steel pipe가 탐지됨에 따라 검출능이 steel pipe에 한해서는 $\phi 5\text{cm}$ 이상이며, 역으로 주었던 레이더파의 전파속도 역시 soil에서는 기존의 Table의 값과 유사함을 데이터로서 확인하였다.

또, soil내 매설 시험편간 거리를 충분히 주어 매설함에 의하여 실제 분해능을 시험할 수는 없었지만 계산치로써 soil내에서는 5.48cm 이상이면 CRT상의 이미지를 구별함이 가능한 것으로 이해되었다.

참 고 문 헌

- [1] Jonathon C. Ralston, David W. Hainsworth., "Application of Ground Penetrating Radar for Coal Depth Measurement", IEEE signal Processing Society, 1999 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP'99, pp. 2275-2278., (1999)
- [2] 현승엽, 김상욱, 김세윤, "자체 설계한 안테나로 구성된 GPR의 파이프 검출능력에 관한 측정", 대한전자공학회 논문지, 제 36권, D 편, 제 3호, pp.19-26, (1999)
- [3] 배성호, 김학수, 윤운상, "지반공학과 구조물 진단 분야에서의 GPR 기술 응용", 한국지반공학회지, Vol. 12, No. 4, pp. 179-193, (1996)
- [4] Mitsui Engineering & Shipbuilding Co.,LTD., "지중 매설물 탐사 레이더 취급설명서"
- [5] 문창수, 김세환, 남육현, 오영철, "Case Study of Ground Penetrating Radar for Subsurface Investigation", The Journal of Engineering Geology, Vol. 7, No. 3, pp. 161-171, (1997)
- [6] 손호웅 등., "지반환경물리탐사", 초판, pp.583-648, 시그마프레스, (1999)
- [7] Kyoji Doi, Noriaki Kimura, Shingo Kumabe, Akira Kawamoto., "A study on horizontal slice imaging of subsurface radar's output", The Institute of Electronics. Information and communication Engineers. Technical Report of IEICE, SANE97-75, (1997)
- [8] Kanji Murasawa, Hiroshi Nishizaki, Chihiro Jyonuta, Noriaki Kimura, "Subsurface Radar with Three Antenna Elements Based on Scattering Theory", Mitsui Engineering & Shipbuilding Co.,LTD, Technical Report of MESC
- [9] 한국콘크리트학회 편, "콘크리트 구조물의 비파괴 검사 및 안전진단", 한국콘크리트학회, p117-124, pp. 155-172 (1995)
- [10] 이종득, "콘크리트 구조물 비파괴 검사", pp.85-91, 도서출판 일광, (1996)
- [11] S. K. Park, T.Uomoto., "Radar Image Processing for Detection of Shape of Voids and Location of Reinforcing Bar in or under Reinforced Concrete", Proceedings of the Non-Destructive Testing in Civil Engineering NDT-CE'97., pp. 53-67, (1997)