論文99-36D-3-3

자체 설계한 안테나로 구성된 GPR의 파이프 검출능력에 관한 측정

(Measurement on Pipe Detectability of the GPR Consisting of Self-Designed Antenna)

玄 昇 燁 *, 金 尙 昱 **, 金 世 潤 **

(Seung-Yeup Hyun, Sang-Wook Kim, and Se-Yun Kim)

요 약

자체 설계한 bow-tie 안테나로 구성된 GPR을 이용하여 마른 모래 속에 매설된 파이프의 검출능력을 조사하였다. 송·수신안테나간의 상호결합을 줄이기 위하여 안테나를 차폐구조로 감쌌다. 안테나 끝을 저항으로 종단시켜 유한 길이의 안테나 구조에 의해 발생하는 ringing을 감소시켰다. B-scan 자료에서 쌍곡선 패턴을 구별해 냄으로써 부가적인 신호처리 과정 없이 다양한 매설물들의 존재 유무를 알 수 있었다.

Abstract

The detectability of pipes buried in dry sand is investigated by using the GPR with self-designed bow-tie antenna. The antennas are covered with shielding structures to reduce the direct-coupling between the transmitting and receiving antennas. The ringing, due to finite length of the antenna, is decreased by performing resistive termination at the ends of the antennas. It is shown that without additional signal processing, the presence of various buried targets can be found by discriminating hyperbolic pattern in B-scan data.

Ⅰ. 서 론

대부분의 GPR(ground-penetrating radar) 시스템은 지표면에서 임펄스를 지하로 보내고, 지하에서 되돌아온 신호로부터 지하구조와 매설물에 관한 정보를 얻기 위해 사용하는 펄스 레이더 시스템이다[1]. 지하를 구성하는 매질이 불연속성을 갖고 있거나 물체가 존재하게 되면 산란을 일으키므로, 지표면을 따라 안테나를 수평으로 이동시키면서 각 지점마다 수신된 시간영역 펄스를 차례로 나타내면 지하 구조에 대한 2차원 영상을 얻게 되는데 이를 B-scan 자료라고 한다. B-scan 자료를 표현하는 방법은 크게 일정 시간마다 수신파의 강도를 위글(wiggle)의 진폭에 비례하여 표시하는 방법과 가장 높은 강도를 검은색, 가장 낮은 강도를 흰색으로 지정하여 그레이 스케일(gray-scale)로 나타내는 방법으로 나뉜다[2]. 특히 가스관, 수도관 같은 파이프에 대한 B-scan 자료의 영상은 쌍곡선 패턴을 형성하여 매설물의 존재 유무를 쉽게 판별할 수 있다. 또한 scan 자료로부터 지하 매설물의 단면적, 모양, 크기, 깊이를 결정할 수 있다. 펄스가 가장 빨리 수신되는 지점의 송·수신안테나의 중심점이 지표면상에서 매설물의 위치가 되고, 펄스의 도달시간은 매질내의 전파속도와 물체가 묻혀있는 깊이에 관련되므로 이로부터 깊이를 알아낼 수 있다. 물체의 모양은 송·수신 안테나의 구성방법과 지표면에서 일정 면적을 스캔(scan)하여 얻은 3차원 영상을 통하여 결정할 수 있다[3].

* 學生會員, 高麗大學校 電波工學科
(Dept. Radio and Sciences Eng., Korea Univ.)
** 正會員, 韓國科學技術研究院 映像미디어研究센터
(Imaging Media Research Center, KIST)
接受日字:1998年10月23日, 수정완료일:1999年3月2日

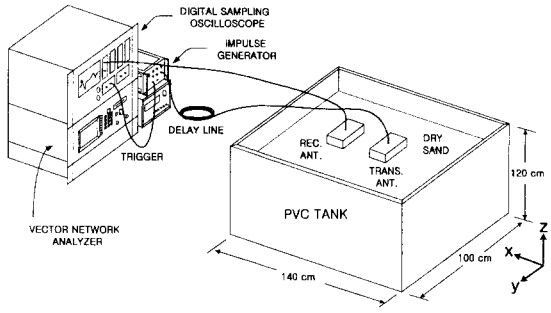
GPR 시스템의 수신신호는 매설물에 산란되어 돌아온 신호와 그 외의 신호로 크게 둘로 나뉜다. 그 외의 신호는 송신과 수신안테나 사이의 직접결합 신호와 지표면 반사로 구성된다. 일반적으로 매설물에 의한 신호가 송신과 수신안테나 사이의 직접결합보다 낮은 강도이므로 매설물 정보를 검출하기 매우 어렵다. 안테나간의 직접결합은 안테나의 설계에 의하여 줄일 수 있으나 지표면과의 상호작용은 복잡한 관계를 형성하고 있으므로 개선이 어렵다.

GPR 시스템에서 가장 중요한 부분인 안테나의 구성방법에 따라 송·수신 겸용인 monostatic GPR과 송·수신안테나를 따로 분리한 bistatic GPR로 나뉜다. 임펄스 레이더의 경우 짧은 펄스를 송·수신 해야 하므로 monostatic 형을 사용하려면 높은 신호 강도를 갖는 송신 단으로부터 수신기와 수신신호의 보호를 위해 초고속 절환 스위치가 필요하다. 그러나 bistatic 형에서는 대인 지뢰처럼 지표면 가까이 존재하는 물체는 직접결합 신호에 가려져 검출이 되지 않을 수 있으므로, 안테나간의 직접결합이 매우 중요한 인자(factor)가 된다[1,3].

본 논문은 Smith[4]의 안테나 구조를 바탕으로 FDTD 시뮬레이션으로 안테나를 자체 설계한 후 실제로 제작하여 bistatic GPR을 구성하였다. 직접결합을 줄이기 위해 송·수신안테나 각각을 도체로 차폐시킨 구조를 기본으로 안테나를 저항으로 종단시켜 송신펄스의 왜곡을 줄였다. 실험실에 마련된 모래 탱크에서 파이프를 매설하여 수평위치, 매설된 깊이에 따른 B-scan 자료를 구성하여 부가적인 신호처리를 수행하지 않고서도 존재 유무를 쉽게 판별할 수 있음을 보였다.

Ⅱ. GPR 시스템의 구성

실험에서 지하구조를 이상적인 경우로 선정하기 위하여 그림 1 처럼 도전성이 낮은 마른 모래를 채운 탱크 구조(140 cm × 100 cm ×120 cm)로 제한하였다. 송·수신안테나는 모래 표면에 대하여 높이(z축 방향) 조절과 수평방향(x축 방향)으로 이동이 가능하도록 이송장치에 장착시켰다. 신호원으로 진폭이 0~100 V, 펄스폭이 0.6 ns 인 AVTECH model AVH-HV1-C-P-T1, 수신기는 Tektronix 11801C Digital Sampling Oscilloscope, sampling head는 Tektronix SD-26을 사용하였다. 임펄스 발생기(impulse generator)와 선로, 선로와 송신 안테나간에는 완전한 임피던스 정합을 이루지 못하므로 신호원과 송신안테나 사이에 약 50 ns의 지연(delay) 선로를 연결하여 다중반사의 영향을 시간 축 상에서 분리시켰다.



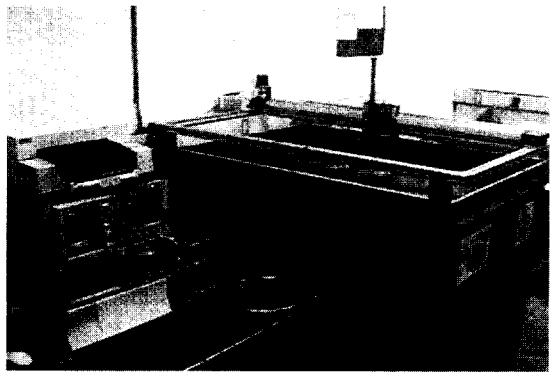


그림 1. 마른 모래 내에 매설된 파이프의 탐지를 위한 GPR 구성도

Fig. 1. Configuration of GPR for detection of pipes buried in dry sand.

그림 1에 사용하는 임펄스 GPR 안테나는 다음과 같은 요건을 가져야 한다. 급전점(feed point)에서 반사되는 신호가 최소가 되도록 광대역 정합(broadband matching) 특성을 가져야 하고, 인가한 펄스를 왜곡시키지 않고 충실하게 재생할 수 있어야 하며, 복사신호를 원하는 방향으로만 향하도록 해야한다. 따라서 그림 2 와 같이 임펄스 GPR 안테나는 광대역 다이폴(dipole)로 주로 사용되는 bow-tie로 선정하고, 안테나의 복사파에 의해 다른 전자파 환경에 미칠 수 있는 영향을 최소화면서 외부 잡음을 차단할 수 있도록 안테나의 측면과 후방면을 도체로 차폐시켰다. 유한 길이의 안테나에 짧은 펄스를 인가하는 경우에 발생하는 ringing은 저항성 부하(resistive loading)를 이용하

여 줄였다. 도전성 매질로 코팅(coating)하는 방법[5]이 우수한 성능을 갖지만 제작이 어려운 단점을 지니고 있어 그림 2 처럼 저항으로 안테나 끝을 종단시키는 방법을 이용하였다.

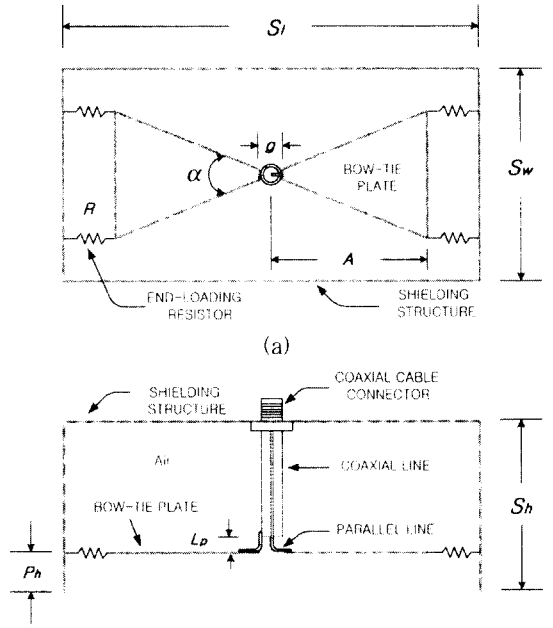


그림 2. Bow-tie 안테나의 기본 구조 (a) 조감도 (b) 측면도

Fig. 2. Basic structure of bow-tie antenna. (a) top view (b) side view

직접결합이 높으면 지표면 가까이 매설된 물체의 응답신호가 작기 때문에 직접 결합신호에 가려져 검출되지 않을 수 있다. 또한 안테나는 지표면상에서 빠른 스캔이 요구되므로 지표면에서 일정 높이에 위치하게 된다. 따라서 GPR 시스템에서 발생하는 주요한 직접결합은 공기 중에서 전파되는 신호의 결합과 지표면과의 상호작용에 의한 결합으로 나눌 수 있다. 지표면과의 상호작용은 복잡한 관계를 형성하고 있어 개선이 어렵지만 공기 중에 의한 직접결합은 안테나 설계 방법으로 개선할 수 있다. 본 논문에서는 Smith의 안테나 구조를 기본으로 bow-tie를 차폐구조 내에 위치시켜 직접결합을 줄이는 구조로 선정하였다. 그러나 차폐구조 내부에 너무 깊게 위치시키면 차폐구조와 안테나간의 상호작용에 의한 ringing이 증가할 수 있으므로 그림 2 와 같은 구조에서 bow-tie의 위치 P_h 와 차폐구조의 크기 S_w, S_l, S_h를 주된 변수로 전형적인 마른 모래 ($\varepsilon_r = 4 \sim 6$, $\sigma = 0.0001 \sim 0.01$)[11]에 대하여 참고문헌 [6] 에서 제시한 GPR용 안테나의 3차원 FDTD를 이용한 수치계산을 수행하여 표 1 과 같은 설계치를 얻었다.

표 1. FDTD를 이용한 bow-tie 안테나의 설계치

Table 1. Design data of bow-tie antenna by using FDTD.

		value
BOW-TIE ANTENNA	α	60 °
	A	5 cm
	g	0.6 cm
SHIELDING STRUCTURE	S_w	8 cm
	S_l	14 cm
	S_h	5 cm
END-LOADING RESISTOR	R	200 Ω
POSITION OF BOW-TIE PLATE	P_h	1 cm
PARALLEL LINE LENGTH	L_p	0.2 cm

Bow-tie와 차폐구조는 0.3 mm 두께의 동판으로 제작하고, 급전선은 RG-402 semi-flexible 동축선을 사용하였다. 동축선과 bow-tie를 연결하기 위하여 동축선의 내심과 동일한 지름인 와이어(wire)로 0.2 cm 길이의 평행 도선을 만들어 납땜으로 접속시켰다.

유한 길이의 안테나 구조로 인하여 발생하는 투과펄스의 왜곡을 감소시키기 위해 사용한 종단 부하 저항(end-loading resistor)의 역할을 조사하기 위하여 간이 나무 탱크(67 cm × 67 cm × 60 cm)에 마른

모래를 탱크 바닥에서 20 cm 높이까지 채운 후 모래 표면의 중심 위치에 송신안테나를 위치시키고, 반대편에 수신안테나를 위치시켜 투과펄스를 측정하였다. 측정에 사용한 안테나는 저항 없이 차폐만 시킨 구조와 안테나 끝을 4개의 200 Ω 저항으로 종단시킨 구조 두 가지 경우에 대하여 조사하였다. 그 결과 그림 3과 같이 저항으로 종단시키지 않은 구조는 인가한 펄스의 모든 주파수에서 공진하지 못하고, 안테나 끝 부분과 급전점 사이에서 다중반사를 일으켜 복사파는 진동하면서 감소하는 펄스의 중첩으로 나타났다. 저항으로 종단시킨 경우에 peak(0)는 0.3 V 로 종단시키지 않은 경우와 동일한 진폭을 갖으나 peak(1)은 종단시키지 않은 경우의 1/3로 줄어들었으며, peak(3), peak(4), peak(5), …로 갈수록 저항으로 종단시킨 경우에 거의 0.1 V 미만으로 줄어들어 ringing이 크게 개선되었다.

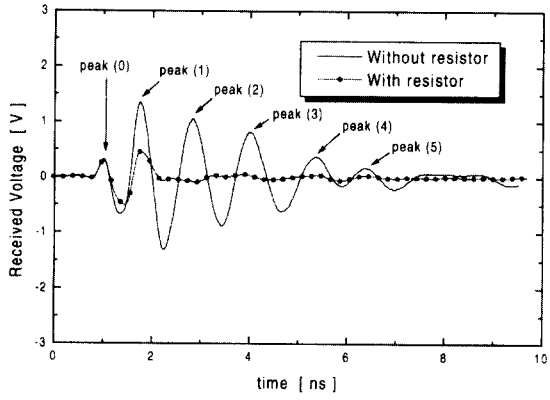


그림 3. 종단 저항이 있을 때와 없을 때의 수신 전압 비교

Fig. 3. Comparison between the received voltages with and without terminated resistors.

Ⅲ. 매설된 파이프의 검출능력 측정시험 및 결과분석

파이프의 검출능력을 알아보기 위해 매설물로 표 2와 같은 동 파이프와 물을 채운 플라스틱 파이프를 그림 1 의 모래 탱크에 매설하여 B-scan을 수행하였다.

여러 가지 상황에 대한 검출능력을 알아보기 위해 안테나 시스템을 모래 표면에서 약 2 cm 높이에 위치시키고, 송·수신안테나 사이를 30 cm 간격을 유지한 상태에서 수평방향(모래 탱크의 x 방향)으로 5 cm 씩 이동시키면서 측정하였다.

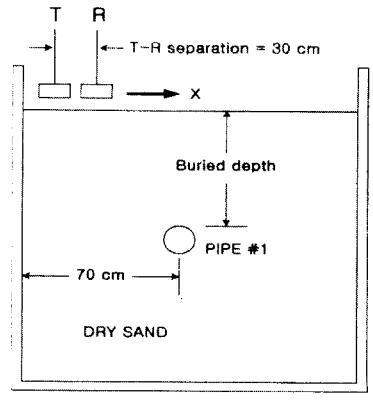
표 2. 측정에 이용한 파이프

Table 2. Pipes used for measurement.

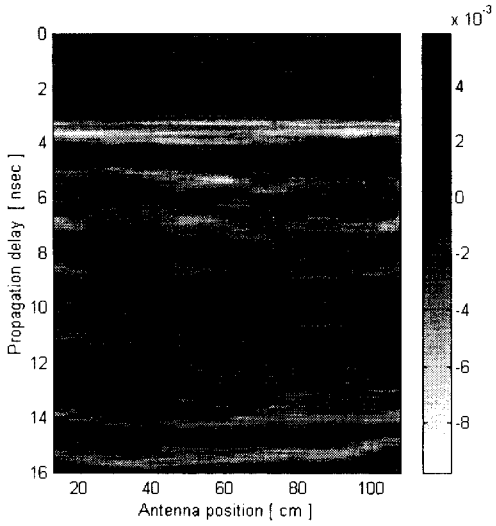
	PIPE #1	PIPE #2	PIPE #3
RADIUS [cm]	3.97	2.04	2.5
MATERIAL	COPPER	COPPER	WATER-FILLED PLASTIC

실험에서 지하구조를 유한한 탱크 구조로 제한하므로 탱크 벽에 의한 영향을 알아보기 위해 매설물이 없는 상태에서 B-scan을 수행한 결과 그림 4(b)와 같이 벽에 의한 영향은 무시할 수 있을 정도로 작게 나타났다. 단지 3 nsec 시간에 6 mV의 가장 높은 강도로 송·수신안테나 사이의 직접결합 신호만 항상 일정하게 보였다.

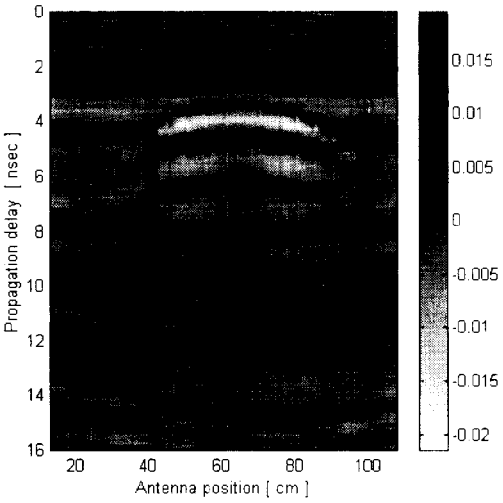
동일한 물체에 대하여 매설된 깊이가 다른 경우의 검출능력을 조사하기 위해 파이프 #1이 1, 15, 38 cm 깊이에 매설된 경우 B-scan을 수행한 결과 각각 그림 4(c), (d), (e)처럼 매설물에 대하여 쌍곡선 패턴을 형성하여 물체의 존재를 알 수 있었다. 매설 파이프에 대한 응답이 쌍곡선 패턴을 이루는 것은 안테나 시스템의 지표면상의 위치마다 안테나에서 매설 파이프를 바라보는 직선거리와 관련이 있다. 매설 파이프의 수직 위 지점에 안테나 시스템이 위치하면 펄스가 가장 빨리 도달하게 되고, 이 위치에서 수평으로 계속 이동시킬 때마다 안테나에서 매설 파이프를 바라보는 직선거리가 길어지므로 시간상으로 지연된 응답이 나타나게 된다. 따라서 안테나 시스템을 수평으로 이동시키면서 측정한 자료를 수평 이동거리에 대한 시간영역 펄스로 표현하면 매설 파이프의 응답은 쌍곡선 패턴을 형성한다.



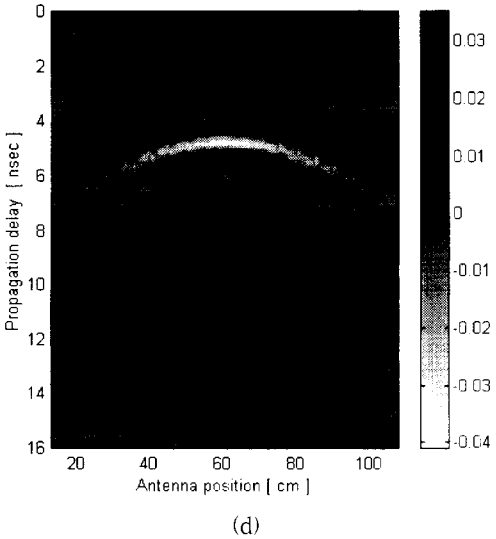
(a)



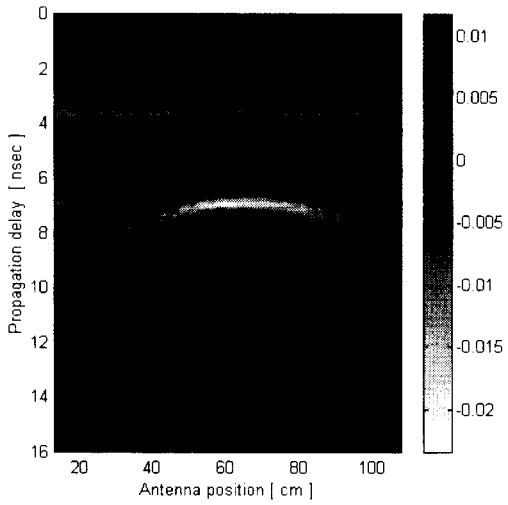
(b)



(c)



(d)



(e)

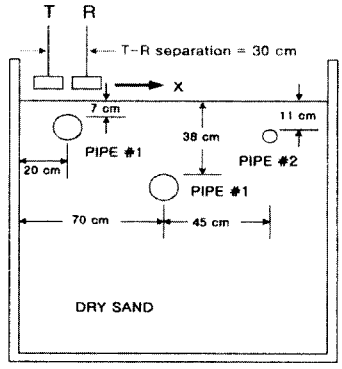
그림 4. 파이프 #1의 매설 위치에 따른 B-scan 자료의 변화 (a) B-scan 단면도 (b) 물체가 없을 경우 (c) 1 cm (d) 15 cm (e) 38 cm

Fig. 4. Variation of B-scan data according to the buried depth of pipe #1. (a) cross-section view of B-scan (b) no target (c) 1 cm (d) 15 cm (e) 38 cm

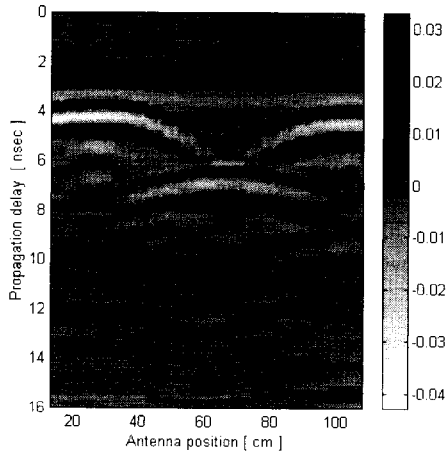
지하구조의 유효 상대 유전율이 높을수록 지하구조 내에서의 전파속도는 느려져 실제 거리에 비하여 전기적인 거리차가 커지므로 쌍곡선의 곡률도 비례하여 증가한다. 지표면 가까이 매설되어 있을수록 신호가 강하게 나타나지만, 그림 4(c)처럼 송·수신안테나 간격보다 낮은 깊이에 묻힌 물체에 의한 산란신호는 경로가 가려져 강도가 낮아졌으며, 실험에 사용한 모래처럼 지하구조가 상대 유전율이 낮고, 안테나의 수평 이동거리에 비해 매우 깊은 위치에 물체가 존재하는 경우에는 안테나를 수평으로 이동시키면서 측정해도 매설물까지 직선거리는 거의 일정하게 유지되어 그림 4(e)처럼 완만한 곡률을 갖는 쌍곡선 패턴을 보였다. 그림 4(c), (d), (e) 모두 쌍곡선의 정점이 탱크 벽으로부터 수평방향으로 약 70 cm 부근에 형성되어 이 위치가 실제 매설물의 수평위치와 동일한 결과를 보였다. 따라서 쌍곡선 패턴의 정점의 위치가 매설물의 수평위치를 나타냄을 알 수 있다.

동일 재질이면서 굵기가 다른 파이프가 수평방향으로 서로 다른 깊이에 존재하는 경우에 대한 검출능력을 알아보기 위해 그림 5(a)처럼 세 개의 동 파이프가 매설된 경우에 B-scan 자료를 구성한 결과 그림 5(b)처럼 파이프의 수와 동일한 수의 쌍곡선 패턴이

형성되어 매설물의 존재 여부를 쉽게 알 수 있었다. 지표면 가까이 매설된 파이프가 신호 강도가 강하게 수신되어 뚜렷한 쌍곡선 패턴을 형성하고, 파이프 #2처럼 굵기가 가늘수록 굵은 파이프(파이프 #1)보다 곡률이 큰 쌍곡선 패턴을 보였으며, 7 cm 깊이에 위치한 파이프 #1보다 38 cm 깊이에 매설된 파이프 #1에 대한 쌍곡선의 곡률이 완만하면서 약한 강도의 쌍곡선 패턴을 보였다. 쌍곡선 패턴의 정점위치가 각각의 매설파이프의 실제 위치와 동일하게 나타나 B-scan 자료에 의하여 여러 매설물에 대한 수평면 상에서의 위치 판별이 용이함을 알 수 있었다.



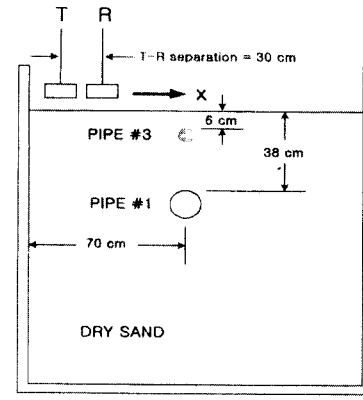
(a)



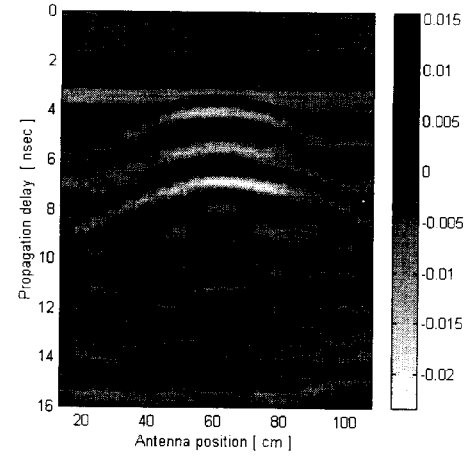
(b)

그림 5. 세 개의 파이프가 마른 모래에 매설된 경우의 B-scan 자료 (a) 표면에서 7, 38, 11 cm 깊이에 각각 매설된 파이프 #1, #1, #2의 단면 분포 (b) B-scan 자료

Fig. 5. B-scan data for three pipes buried in dry sand. (a) cross-section distribution of the pipes #1, #1, and #2 buried at the depth of 7, 38, and 11 cm below the air/sand interface, respectively (b) B-scan data



(a)



(b)

그림 6. 두 개의 파이프가 마른 모래에 매설된 경우의 B-scan 자료 (a) 표면에서 6, 38 cm 깊이에 각각 매설된 파이프 #3, #1의 단면분포 (b) B-scan 자료

Fig. 6. B-scan data for two pipes buried in dry sand. (a) cross-section distribution of the pipes #3 and #1 buried at the depth of 6 and 38 cm below the air/sand interface, respectively (b) B-scan data

다른 재질, 규격의 파이프가 동일한 수평위치에 서로 다른 깊이에 매설된 경우에 대한 검출 능력을 알아보기 위하여 그림 6(a)처럼 탱크 벽에서 수평방향으로 70 cm 위치에 파이프 #3는 6 cm 깊이, 파이프 #1은 38 cm 깊이에 매설하여 B-scan을 수행한 결과 그림 6(b)와 같이 나타났다. 파이프 #3가 파이프 #1의 지름의 절반 정도이므로 산란 단면적이 작아져 상대적으로 곡률이 큰 쌍곡선을 보였으며, 파이프 #1이 파이프 #3보다 깊은 곳에 매설되어 있어도 파이프 #1이 도체이

므로 신호가 더 강하게 나타났다. 탱크 벽에서 수평방향으로 70 cm 지점에 안테나 시스템이 위치한 경우에 신호가 가장 빨리 도달하여 실제로 파이프의 정점 위치가 수평방향 70 cm 지점임을 알 수 있었다. 파이프가 지하에 깊게 매설될수록 시간상으로 늦게 응답신호를 보이므로 지하구조의 정확한 유전율을 알게 되면 전파속도를 결정할 수 있으므로 응답시간에 의하여 매설 깊이를 정확하게 결정할 수 있으나, 일반적으로 실제 지하구조는 비균일, 비등방성이므로 전체의 정확한 유전율을 알아내기 어렵기 때문에 깊이를 결정하기 위한 신호처리 기법이 필요하다.

Ⅳ. 결 론

자체 설계 및 제작한 bow-tie 안테나로 구성된 GPR을 이용하여 신호처리를 수행하지 않더라도 여러 가지 경우에 대해 파이프를 검출할 수 있었다. Bow-tie 안테나를 도체로 차폐시켜 외부 전자파 환경에 미칠 수 있는 영향을 차단하면서 bow-tie를 차폐구조 내부에 위치시켜 송·수신간의 직접결합을 줄이고, 안테나 끝을 저항으로 종단시켜 안테나의 유한길이에 의해 발생하는 ringing을 감소시켰다.

매설물의 존재여부는 B-scan 자료의 2차원 영상에서 쌍곡선 패턴의 형성에 따라 쉽게 판별할 수 있었다. 동일한 매설물일 경우 지표면에 가까울수록 신호강도가 커지나, 송·수신안테나 간격보다 가까운 깊이에 묻혀있는 물체에 의한 산란신호는 안테나간의 직접적인 수신 경로가 가려져 신호 강도가 낮아졌다. 여러 개의 파이프가 수평방향으로 다른 위치, 깊이에 매설되어 있어도 쌍곡선의 수에 의하여 매설물의 수를 쉽게 알아낼 수 있었다. 동일 수평위치에 다른 재질인 파이프가 서로 다른 깊이에 매설되어 있어도 매설된 파이프 각각에 대응하여 쌍곡선 패턴이 형성되고, 파이프의 굵기가 가늘수록 산란 단면적이 작아지므로 쌍곡선 곡률이 크게 나타났으며, 플라스틱 같은 비도전성 물체보다 도체인 경우에 더 강한신호가 수신된다. 매설물의 수평방향의 위치는 쌍곡선 패턴의 정점 위치와 동일하게 나타나 미지의 매설물에 대한 수평방향의 위치 판별이 가능함을 알 수 있었다. 매설 깊이는 전파속도와 응답신호의 시간에 의해 결정할 수 있으나, 실제 지하구조 문제에서는 정확한 유전율을 알 수 없으므로 지하구조에서의 전파속도 결정을 위한 신호처리 방법을 도입해야 매설 깊이를 정확하게 결정할 수 있다.

안테나 설계시 지하구조는 참고문헌 [1] 에 제시된 마른 모래에 대한 유전율과 도전율을 이용하여 FDTD 시뮬레이션을 수행하였다. 앞으로 지하구조로 사용한 모래와 bow-tie를 종단시키기 위해 사용한 저항의 전기적 특성을 정확하게 측정한 후 GPR 시스템 전체의 FDTD 시뮬레이션과 본 논문의 측정 결과의 일치성을 제시할 것이다.

참 고 문 헌

[1] D. J. Daniels, Subsurface-Penetrating Radar, IEE : London, UK, 1996.

[2] L. Peters, J. J. Daniels, and J. D. Young, "Ground penetrating radar as a subsurface environmental sensing tool," *Proc. IEEE*, vol. 82, pp. 1802-1822, Dec. 1994.

[3] D. J. Daniels, D. J. Gunton, and H. F. Scott, "Introduction to subsurface radar," *Proc. IEE*, pt. F, vol. 135, no. 4, pp. 278-320, Aug. 1988.

[4] G. S. Smith and W. R. Scott, Jr., "A scale model for studying ground penetrating radars," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. GRS-27, pp. 358-363, July 1989.

[5] K. L. Shlager, G. S. Smith, and J. G. Maloney, "Optimization of bow-tie antennas for pulse radiation," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-42, no. 7, pp. 975-982, July 1994.

[6] 현승엽, 김상욱, 김세윤, "3차원 FDTD를 이용한 GPR 안테나의 복사해석," 대한전자공학회 논문지, 제 36권, D편, 제 3호, pp. 12, 1999

저 자 소 개

玄 昇 燁(學生會員)
1974년 8월 3일생. 1997년 2월 제주대학교 통신공학과 졸업(공학사). 1999년 2월 고려대학교 대학원 전파공학과 졸업(공학석사). 1999년 3월 ~ 현재 고려대학교 대학원 전파공학과 박사과정 재학중. 주관심분야는 안테나 및 전자파 산란, GPR 등임

金 世 潤(正會員) 第 32卷 A編 第 6號 參照
현재 한국과학기술연구원 영상미디어 연구센터 책임연구원

金 尙 昱(正會員) 第 32卷 A編 第 8號 參照
현재 한국과학기술연구원 영상미디어 연구센터 연구원