지하투과레이더를 이용한 이상구간 평가 시 안테나 지향성의 영향

The Effect of Directivity of Antenna for the Evaluation of Abnormal Area Using Ground Penetrating Radar

강	성	<u>रे</u>	Kang, Seonghun	(ہ	종	섭²	Lee, Jong-Sub
0]	성	진	Lee, Sung Jin	박	영	곤	Park, Young-Kon
홍	원	택4	Hong, Won-Taek				

Abstract

The ground penetrating radar (GPR) signal can be measured with different amplitudes according to the directivity, so the directivity of the antenna should be considered. The objective of this study is to investigate the directivity of antenna by analyzing the reflection characteristics of electromagnetic waves radiated from the antenna, and to evaluate effective range of angle that can inspect an abnormal area according to the directivity of antenna. For the measurement of the directivity, a circular metal bar is used as reflector and the signals are measured by changing the angle and the distance between reflector and antenna in the E- and H-plane. The boundary distance between the near field and the far field is determined by analyzing the amplitudes of reflected signals, and two points with different distances from each of near and far fields are designated to analyze radiation patterns in near and far fields. As a result of radiation pattern measurement, in the near field, minor lobes are observed at angle section at more than 50° in both E- and H-plane. Therefore, antenna has the directivity for the direction of main lobe and minor lobes in near field. In the far field, antenna has the directivity for a single direction of main lobe because minor lobes are not observed. The amplitude of the signal reflected from the near field is unstable, but it can be distinguished from noise. Therefore, in the near field, the ground anomaly can be detected with high reliability. On the other hand, the amplitude of the signal reflected from the far field is stable, but it is hard to distinguish between reflected signal and noise because of the excessive loss of electromagnetic wave. The analyses of directivity in the near and the far fields performed in this study may be effectively used to improve the reliability of the analyses of abnormal area.

요 지

지하투과레이더 신호는 같은 대상지반에 대하여 탐사를 수행하더라도 안테나의 지향성에 따라 신호의 진폭이 다르 게 측정될 수 있으므로 이상구간 평가 시 안테나의 지향성을 고려하여야 한다. 본 논문의 목적은 전자기파의 반사특성 분석을 통하여 안테나의 지향성을 조사하고, 지향성에 따른 이상구간의 검측이 가능한 각도의 유효범위를 평가하는

Copyright © 2017 by the Korean Geotechnical Society

¹ 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사수료 (Member, Ph.D. Candidate, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

² 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

³ 정회원, 한국철도기술연구원, 광역도시교통연구본부 책임연구원 (Member, Principal Researcher, Metropolitan Transportation Research Center, Korea Railroad Research institute)

⁴ 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사수료 (Member, Ph.D. Candidate, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ., Tel: +82-2-3290-3838, Fax: +82-2-3290-5999, 01698788767@korea.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

^{*} 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2018년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

것이다. 지향성 측정을 위하여 원형의 금속봉을 반사체로 설정하고 전자기파의 E-평면(E-plane)과 H-평면(H-plane)에 대하여 안테나와 이루는 각도와 거리를 조절하며 반사파를 측정하였다. 측정된 반사파의 분석을 통하여 안테나에 대한 영역의 경계를 설정하였으며, 근거리장 및 원거리장 영역에서 각각 서로 거리가 다른 두 지점을 설정하여 근거리 장 및 원거리장 영역에서의 방사 패턴을 조사하였다. 방사 패턴 측정 결과, 근거리장에서는 E-평면 및 H-평면 모두 최소 50° 이상의 구간에서 부엽이 나타나 주엽 방향 및 부엽 방향에 대하여 지향성을 보인 반면, 원거리장에서는 주엽 방향에 대해서만 지향성을 보였다. 근거리장 영역에서는 반사파의 진폭이 변동을 보이긴 하나 반사파와 잡음의 구분이 가능하여 분석의 신뢰도가 높은 반면 원거리장 영역에서는 반사파의 진폭은 안정된 모습을 보였으나 전자기파 손실이 크기 때문에 반사파와 잡음의 구분이 어려워 분석의 신뢰도가 낮을 것으로 판단되었다. 본 연구에서 수행된 근거리장과 원거리장에서의 지향성 평가는 도심지와 같이 임의의 위치 및 깊이에 존재할 수 있는 이상구간 평가 시 신뢰도 향상에 활용될 수 있음을 보여준다.

Keywords : Directivity, Far field, Ground penetrating radar, Main lobe, Minor lobe, Near field

1. 서 론

최근, 도심지 지반의 이완으로 인하여 지반침하 및 도심지 싱크홀 발생사례가 증가하고 있으며 이에 따른 피해 또한 급증하고 있다(Choi et al., 2005). 도심지 지 반 이완현상은 지반 내에 매설된 시설물의 노후화 및 파손에 의하여 발생하는 토사유출이 주된 발생사유이 므로 도심지 내 매설물이 존재하는 임의의 위치에서 발 생할 수 있다(Kwak et al., 2015). 도심지 지반의 이상구 간은 진행 초기에 육안으로 식별하기에 어려우며, 발생 규모 대비 막대한 피해를 야기할 수 있으므로 이를 사전 에 조사할 수 있는 방법에 대한 연구가 요구된다. 지반 이상구간 조사방법 중 비파괴 탐사법은 원위치 관입시 험법에 비하여 상대적으로 소요 시간이 짧고, 넓은 범위 의 지반에 대한 조사가 가능하다는 장점이 있으므로 시 험공간 및 소요시간이 한정된 도심지에 대한 적용성이 우수하다.

대표적인 비파괴 탐사법으로는 지하투과레이더 탐사 (ground penetrating radar survey), 전기비저항 탐사(electrical resistivity survey), 표면파 탐사(surface wave survey) 등 이 있다. 전기비저항 탐사와 탄성파 탐사의 경우, 전극 및 수진기의 설치가 필수적으로 선행되어야 하므로 아 스팔트 포장층의 부분적인 제거가 필요하며 넓은 탐사 구간을 필요로 한다. 반면에 지하투과레이더 탐사는 포 장층 제거가 선택적이며, 장비의 구성과 탐사 방법이 간 소하여 넓은 구간에 대한 신속한 탐사가 가능하므로 도 심지 지반 이상구간 조사에 효과적으로 이용될 수 있다 (Davis and Annan, 1989; Smitha et al., 2016; Thitimakorn et al., 2016).

지하투과레이더 탐사에 사용되는 안테나는 차폐케이스 의 유무 및 작동주파수에 따라 각기 다른 지향성(directivity) 을 보이므로 안테나와 반사체가 이루는 각도에 따라 측 정 신호의 변화를 야기한다(Ahmed et al., 2016; Valle et al., 2001). 지하투과레이더 탐사를 통한 이상구간 조 사 시 안테나가 이동함에 따라 이상구간과 이루는 각도 가 지속적으로 변하게 되므로, 같은 대상이더라도 안테 나의 지향성에 따라 상이한 신호가 측정될 수 있다. 그 러나 지하투과레이더 탐사로부터 획득된 전자기파 신 호는 안테나와 반사체가 이루는 각도와는 별개로 탐사 위치에서의 진폭 및 위상을 시계열로 나타내므로(GSSI, 2012) 지하투과레이더 신호 분석 시 지향성의 영향을 고 려하기 어려운 실정이다. 기 상용화되어 지하투과레이 더 탐사에 일반적으로 사용되는 안테나들의 경우 치수 등과 같은 외형적인 요소, 작동주파수 및 유효 깊이만을 명시하므로, 효과적인 지하투과레이더 탐사 및 높은 신 뢰도의 결과 도출을 위하여 탐사 깊이 및 반사체 거리에 따른 지향성 도출은 필수적으로 선행되어야 한다.

안테나 지향성을 도출하기 위하여 쌍극자의 형태, 차폐 케이스의 유무 등 안테나의 기본구조에 따른 안테나 지향 성에 대한 연구가 수행되어 왔다. Valle et al.(2001)는 수치해석을 통한 지향성과 실측한 지향성을 비교함으 로써 지향성의 예측 가능성에 관한 연구를 수행하였으 며, Warren and Giannopoulos(2012)는 유한차분 시간영 역 모델을 이용하여 근거리장 및 원거리장 영역에서의 안테나 지향성을 예측하였다. Jiao et al.(2000)은 지향성 의 측정 방법, 안테나의 주파수, 매질의 종류를 변경해 가며 수치해석을 수행하였으며, 각 요인이 지향성에 미 치는 영향을 평가하였다. 또한, 안테나 내부 구조를 개 선함으로써 안테나의 분해능 및 지향성을 향상시키기 위한 연구가 수행된 바 있다(Mikhnev and Vainikainen, 2003; Bialkowski and Wang, 2009; Wang et al., 2013). 그러나 지하투과레이더 탐사에서 이용되는 안테나에 대 한 실험적 지향성 평가 및 영향에 대한 연구는 미비한 실정이다.

본 연구에서는 지하투과레이더 탐사에 이용되는 안테 나의 지향성을 조사함으로써 지하투과레이더 탐사를 통 하여 이상구간의 검측이 가능한 지반 이상구간과 안테 나가 이루는 각도의 유효범위를 평가하고자 하였다. 지 향성 조사를 위하여 안테나와 반사체가 이루는 거리와 각도를 조절하여 근거리장 및 원거리장 영역에서의 방 사 패턴을 측정하였으며, 주엽과 부엽의 범위를 설정하 였다. 본 논문은 지하투과레이더 탐사의 원리 및 탐사 거리에 따른 전자기파의 지향성에 대하여 설명하며, 지 하투과레이더 탐사에 사용되는 안테나의 지향성 평가를 위한 실험구성, 실험결과, 그리고 분석 내용을 다룬다.

2. 배경 이론

2.1 전자기파의 특성

2.1.1 유전율과 전기적 임피던스

전자기파는 전기장과 자기장이 서로 유도를 반복하며 공간으로 방사되는 파동을 의미하며 탄성파와 달리 진 공상태에서도 전파가 이루어진다. 전자기파로 인하여 매 질에 전기장이 작용할 경우 매질의 종류에 따라 각기 다 른 정도로 전기적 분극(electric polarization)이 일어나며, 전기적 분극의 발생 정도를 매질의 유전율(permittivity)

Table 1. Representative relative permittivity of various materials

Туре	Material	Relative permittivity, ϵ_{r} []		
Air	Air	$1.00059~(\cong~1)$		
Watar	Fresh water	81		
Waler	Sea water	70		
	Sand (dry)	4 - 6		
	Sand (saturated)	25		
Soil	Silt (saturated)	10		
	Clay (dry)	2 - 6		
	Clay (saturated)	8 - 12		
Others	Metal	00		

이라고 한다. 진공에서의 유전율에 대하여 매질의 유전율 이 이루는 비율을 비유전율(& : relative permittivity)이라 고 하며, 비유전율은 무 차원의 값이므로 매질의 유전율 대소관계를 용이하게 비교할 수 있다. 지반공학에서 빈번 하게 다루어지는 다양한 매질의 비유전율 값은 Table 1 과 같다(ASTM D6432; Daniels, 2004; Markovaara-Koivisto et al., 2014).

전자기파가 매질에서 전파될 때, 주파수에 따라 변하 게 되는 매질의 저항적 성질을 매질의 전기적 임피던스 (z : electrical impedance)라고 하며, 전기적 임피던스는 옴(Ω)의 단위를 사용한다. 지반과 같이 매질이 비강자 성인 경우 전기적 임피던스는 식 (1)과 같이 비유전율 값의 제곱근과 반비례한다.

$$z \propto \frac{1}{\sqrt{\mathcal{E}_r}} \tag{1}$$

여기서, z는 매질의 전기적 임피던스를 의미하며 &은 매질의 비유전율 값을 의미한다. 즉, 매질의 비유전율 값이 클수록 전기적 임피던스는 작은 값을 가진다. 금속 의 경우, Table 1과 같이 무한대에 해당하는 매우 큰 값 이므로 금속의 전기적 임피던스는 0에 수렴한다(Annan, 2003).

2.1.2 반사계수

전자기파는 전기적 임피던스가 서로 다른 두 매질의 경계면에서 반사 혹은 투과한다(Daniels, 2004). 반사파 의 진폭과 위상은 경계면 전후 두 매질의 전기적 임피던 스에 따라 결정되며, 입사파 진폭에 대한 반사파 진폭의 비(ratio)는 반사계수(reflection coefficient)로 정의된다. 반사계수는 식 (2)와 같이 경계를 이루는 두 매질의 전 기적 임피던스(z1, z2)를 이용하여 계산된다(Jol, 2008).

$$R = \frac{-z_1 + z_2}{z_1 + z_2} \tag{2}$$

여기서, R은 반사계수를 의미하며 z₁과 z₂는 각각 경 계면 이전의 매질과 경계면 이후의 매질의 전기적 임피 던스를 의미한다. 반사계수의 부호는 입사파와 반사파 간의 위상관계를 나타내며 양(+)의 반사계수는 입사파 와 동일한 위상(in-phase)인 반사파, 음(-)의 반사계수는 입사파와 반대의 위상(antiphase)인 반사파를 의미한다. 또한, 반사계수의 절댓값이 클수록 반사파가 큰 진폭을 보임을 의미한다(Daniels, 2004; Salako and Adepelumi, 2016).

비유전율 및 전기적 임피던스가 서로 다른 매질의 경 계면에서 반사된 신호의 반사특성을 Fig. 1에 나타내었 다. Fig. 1에 나타낸 실선의 반사파는 입사파와 동일한 위상, 점선의 반사파는 입사파와 반대의 위상을 의미하 고 선이 두꺼울수록 큰 진폭을 의미한다. Fig. 1에서 첫 번째 매질(Mid &)에서 두 번째 매질(Low &)로 전파되 는 경우(비유전율이 상대적으로 높은 층에서 낮은 층으 로 전파되는 경우)는, 전기적 임피던스는 상대적으로 낮 은 층에서 높은 층으로 전파되는 경우에 해당한다. 이 경우는 식 (2)와 같이 반사계수(R₁)가 양의 값이므로 입 사파와 반사파의 위상이 동일하다. 반면, 두 번째 매질 (Low &)에서 세 번째 매질(High &)로 전자기파가 전파 되는 경우(비유전율이 상대적으로 낮은 층에서 높은 층 으로 전파되는 경우)는, 전기적 임피던스는 상대적으로 높은 층에서 낮은 층으로 전파되는 경우에 해당한다. 이 경우는 식 (2)와 같이 반사계수(R2)가 음의 값이므로 입 사파와 반사파는 반대의 위상을 보인다. 또한, 경계면 전후 지층 간의 전기적 임피던스 차이가 클수록 반사계 수의 절댓값이 증가하므로 높은 비율의 에너지 반사가



Fig. 1. Reflection coefficients at the interfaces between the layers that have different relative permittivities. High ϵ_r , Mid ϵ_r , and Low ϵ_r denote the high, middle, and low values of relative permittivity, respectively. High z, Mid z, and Low z denote the high, middle, and low values of electrical impedance, respectively. R₁ and R₂ denote the reflection coefficients of the electromagnetic wave at the interfaces between Mid ϵ_r and Low ϵ_r , and between Low ϵ_r and High ϵ_r , respectively.

발생한다. 예를 들어, 매질 1과 매질 2의 전기적 임피던 스인 z1과 z2가 같은 변화량으로 z1은 감소, z2는 증가할 경우 두 전기적 임피던스의 합은 일정하여 반사계수의 분모 성분은 일정하나 분자 성분이 커져 반사계수의 절 댓값은 증가하게 되어 큰 진폭의 반사파가 발생된다.

2.1.3 매질 내 반사 깊이와 파장

지하투과레이더는 전자기파의 전파시간에 따른 반사 파의 진폭 및 위상을 측정하므로, 매질 내 전자기파의 전파속도를 가정하여 반사체의 깊이를 평가한다. 깊이 에 대한 계산은 식 (3)과 같이 계산되므로 매질의 비유 전율이 실제 값과 유사하게 가정될수록 추정된 깊이의 정확도가 향상된다.

$$L = \frac{1}{2}vt = \frac{ct}{2\sqrt{\varepsilon_r}}$$
(3)

여기서, L은 안테나로부터 반사체까지의 거리를 의 미하고, t는 도달 시간으로써 반사된 전자기파의 왕복 전파시간이며, v는 매질에서의 전자기파의 전파속도이 다. c는 진공에서의 전자기파의 전파속도(2.998 × 10⁸m/s) 이며 &은 매질의 비유전율이다.

안테나의 분해능 및 근거리장의 경계 위치의 추정 등 에 이용되는 매질 내 전자기파의 파장은 매질의 비유전 율과 안테나의 작동주파수에 의해 결정된다(Pérez-Gracia et al., 2010; Millard et al., 2002). 전자기파의 파장(λ), 작동주파수(f), 그리고 비유전율(ε_i)은 식 (4)와 같은 관 계를 가진다.

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{c}{f \cdot \sqrt{\varepsilon_r}} \tag{4}$$

식 (4)와 같이 안테나의 작동주파수가 높을수록 파장 을 줄어들어 분해능은 향상되나 전자기파가 투과할 수 있는 깊이가 얕아지므로, 탐사 목표 깊이를 고려하여 적 합한 작동주파수의 안테나를 선택하여야 한다.

2.2 안테나 특성

2.2.1 근거리장과 원거리장

안테나 하부의 전자기장은 Fig. 2와 같이 근거리장 (near field)과 원거리장(far field)으로 구분되며, 근거리

장은 다시 리액티브성 근거리장(reactive near field)과 복사 근거리장(radiative near field)으로 세분된다. 리액 티브성 근거리장에서는 전자기파의 위상, 전기장과 자 기장의 비례관계가 불안정하며 전파거리가 증가함에 따 라 진폭의 급격한 감쇠를 보인다. 복사 근거리장에서는 전자기파가 비교적 뚜렷한 위상으로 전파되지만 전기 장과 자기장의 세기 및 진폭이 완전한 비례관계를 이루 지는 못한다(Rudge, 1983). 원거리장에서는 전자기파가 안정화되어 전기장과 자기장의 세기가 비례관계를 유 지하며 무한의 영역까지 전파되고, 안테나와의 거리에 상관없이 각도에 따른 진폭의 분포는 일정하게 나타난 다(Jol, 2008).

리액티브성 근거리장 영역과 복사 근거리장 영역의 경계까지의 거리에 대한 최솟값을 구하는 식은 식 (5), (6)과 같이 제시된 바 있으나(Yaghjian, 1986), 경계거리 의 정확한 산정은 실험적으로 수행되어야 한다.

Reactive near field :
$$L_{re} \ge \frac{\lambda}{2\pi}$$
 (5)

Radiactive near field :
$$L_{rad} \ge \frac{2D^2}{\lambda} + \lambda \text{ or } 3\lambda$$
 (6)

여기서, Lre는 안테나 밑면으로부터 리액티브성 근거 리장 영역의 경계에 대한 최소 거리, Lrad는 근거리장 영 역의 경계에 대한 최소거리를 의미하며, D는 안테나의 최대 직경에 해당하는 안테나 쌍극자의 최대 길이, λ는 매질 내 전자기파의 파장을 의미한다. 식 (6)에서 나타낸 Lrad는 표현된 두 값 중 큰 값으로부터 결정되나(Yaghjian, 1986), 지하투과레이더 안테나의 경우 식 (6)의 두 값 중 3λ가 더 큰 값에 해당된다(Millard et al., 2002).



Fig. 2. Near field and far field of ground penetrating radar. L_{re} and L_{rad} denote the distances from the antenna to the boundary between the reactive near and radiative near fields, and from the antenna to the boundary between radiative near and far fields, respectively.

2.2.2 지향성

지향성(directivity)은 안테나의 고유한 특성으로서, 특 정 방향에 대하여 반사 신호를 더 민감하게 측정하는 경 향을 의미한다(Kleiner, 2013). 지향성은 차폐케이스의 존재 여부, 쌍극자의 형상 및 배치 등 안테나의 형상에 따라 서로 다른 특성을 보인다. 지하투과레이더 탐사는 전자기파의 전파시간 및 반사파의 진폭만을 기록하며 (GSSI, 2012), 안테나와 반사체가 이루는 각도는 나타내 지 않는다. 일반적으로 안테나에서 측정된 반사파 신호 는 안테나 수직 하방향의 지반에서 반사된 신호인 것으 로 분석된다(GSSI, 2012).

안테나의 지향성은 안테나와 반사체가 이루는 각도 에 따른 측정된 신호의 진폭 분포를 좌표계에 나타낸 방사 패턴(radiation pattern)을 통하여 평가할 수 있다. 방사 패턴이 특정 방향에 대하여 강한 진폭의 분포를 나타낼 경우, 안테나는 해당 방향에 대하여 더 높은 지 향성을 보인다고 할 수 있다. 안테나의 방사 패턴에서 비교적 윤곽이 명확한 둥근 돌출부 하나를 엽(lobe)이라 고 지칭하며 엽 중 최대의 진폭 분포를 보이는 엽을 주 엽(main lobe), 주엽 이외의 엽을 통틀어 부엽(minor lobe) 이라고 한다(Stutzman and Thiele, 2012).

방사 패턴은 직접 측정 방법(direct measurement)과 간 접 측정 방법(indirect measurement)으로 측정할 수 있 다. 직접 측정 방법은 두 개의 안테나를 각각 송신부, 수신부 안테나로 설정하여 두 안테나의 각도를 변화시 키며 반사파의 진폭을 측정하는 방법이다. 반면 간접 측 정 방법은 송신부와 수신부가 결합된 한 개의 안테나를 이용하여 반사체와 안테나의 각도를 변화시키며 반사 파의 진폭을 측정하는 방법이다. 직접 측정 방법과 간접 측정 방법을 통하여 측정한 방사 패턴은 서로 유사하며, 한 개의 안테나로도 측정이 가능한 간접 측정 방법이 더 실용적인 방법으로 알려져 있다(Millard et al., 2002). 안테나의 방사 패턴은 안테나 주변 삼차원 공간에서 입 체적으로 나타나며, 탐사 진행방향을 포함하는 평면인 E-평면(E-plane)과 그 수직 평면인 H-평면(H-plane)으로 이루어진 두 기준면에 투영하여 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다(Everett, 2013; Jiao et al., 2000). Fig. 3에서 탐 사방향(survey direction)에 해당하는 E-평면과 이에 직 교하는 H-평면은 각각 전기장 벡터(E)와 자기장 벡터 (H)를 포함하는 두 개의 안테나 기준면을 의미한다. 안 테나의 방사 패턴은 안테나의 각도에 따른 반사파 진폭 을 각도에 따라 좌표계에 나타낸 것이며, E-평면 및 H-



Fig. 3. 3-dimensional view of reference planes of ground penetrating radar. E-plane and H-plane denote the planes containing the electric field vector and the magnetic field vector, respectively

평면의 방사 패턴을 분석하여 안테나의 지향성을 평가 할 수 있다. 방사 패턴 측정 시, 전자기파의 감쇠에 의한 영향을 배제하기 위하여 안테나와 반사체 사이의 거리 및 이득값(gain value)은 고정되어야 한다.

3. 실험 구성

3.1 지하투과레이더

지하투과레이더(ground penetrating radar, GPR) 탐사 체계는 전자기파를 송신 및 수신하는 안테나와 측정 신 호를 출력 및 저장하는 메인 컨트롤러로 구성된다. 안테 나는 전자기파 송신 및 수신을 위한 쌍극자가 외부에 노출된 비차폐식 안테나와 쌍극자가 차폐케이스 내부 에 설치된 차페식 안테나로 구분된다. 도심지와 같이 외 부의 전기적 신호에 의하여 다량의 잡음이 예상되는 탐 사구간에서는 차폐식 안테나가 주로 사용되며, 탐사 목 표 깊이에 따라 적절한 작동 주파수를 가진 안테나를 적용함으로써 탐사결과의 정확도를 향상시킬 수 있다 (De Jongh et al., 1999; Rodriguez et al., 2014). 메인 컨 트롤러는 안테나로부터 수집된 신호를 실시간으로 시계 열로 표현 및 저장하며 신호에 적용되는 이득값 또한 조 절할 수 있다. 본 연구에서는 도심지 지반 탐사에 가장 보편적으로 사용되는 미국 Geophysical Survey Systems, Inc.(GSSI)에서 제작된 작동주파수 400MHz인 차폐식 안테나(Model 50400S)와 메인 컨트롤러(SIR-3000)을 사용하였다. 공기의 비유전율(ε_r = 1.00059 ≃ 1), 진공 에서의 전자기파 속도(c = 2.998 × 10⁸m/s), 작동주파수 400MHz를 식 (4)에 대입할 경우, 작동주파수 400MHz 인 안테나의 공기 중 파장(λ)은 약 75cm이다.

3.2 반사체

본 연구에서 사용된 안테나는 송신부와 수신부가 결 합된 형태이므로, 간접 측정 방법을 이용하여 방사 패턴 을 측정하였다. 지하투과레이더는 다양한 경로로부터 반사된 전자기파를 수집하므로 명확한 방사 패턴 측정 을 위하여 높은 반사율을 나타내는 반사체 설정이 요구 된다(Evinemi et al., 2016). 금속은 Table 1과 같이 큰 비유전율 값을 가지고 있으며 전기적 임피던스는 식 (1) 과 같이 0에 수렴한다. 전자기파가 공기 중에서 금속으 로 전파될 시, 반사계수를 구하는 식 (2)에서 zi은 약 1, z2는 0이 되어 반사계수는 -1에 수렴한다. 그러므로 전 자기파는 공기에서 금속으로 전파될 때 대부분 반사되 며, 반사파의 위상은 입사파와 반대로 나타난다. 이와 같은 이유로 본 연구에서는 높이 330cm, 직경 8cm인 원형의 금속봉을 반사체로 설정하여 강한 진폭의 반사 파를 획득하고자 하였다.

지하투과레이더 신호는 일반적으로 초기의 도달 시간 에 강한 진폭의 신호가 측정된다(GSSI, 2012). 이 신호 는 송신부 쌍극자에서 방사되어 안테나 밑면에서 반사 된 전자기파와 안테나 표면을 통하여 전파된 전자기파 가 중첩된 신호이며(Rial et al., 2009), 이를 직접 결합 (direct coupling) 신호라고 한다. 직접 결합 신호는 안 테나 밑면에서 반사될 때 위상이 180°만큼 변화하여 입 사파와 반대의 위상을 보이므로 직접 결합 신호와 동일 한 위상은 입사파와 반대의 위상이며 직접 결합 신호와 동일 한 위상은 입사파와 동일한 위상이다(Hong et al., 2015). 반사체로 설정한 원형의 금속봉에서 반사된 신 호와 직접 결합 신호는 항상 음(-)의 반사계수를 가지므 로(Arcone et al., 2004), 원형 금속봉에서의 반사파는 직접 결합 신호와 동일한 위상을 나타낼 것으로 판단하 였다.

3.3 실험 방법

공기 중에서 수행된 방사 패턴 실험 결과를 이용하여 비유전율이 다른 매질에 대하여 동일한 도달 시간에 해 당하는 거리를 계산함으로써 해당 매질에서의 지향성 을 예측할 수 있다. 본 연구에서는 공기 중에서 다양한 각도에 대하여 반사체로부터 거리 640cm까지 반사파를 측정하고 방사 패턴을 나타내어 다른 매질에서의 지향 성을 예측하고자 하였다. 예를 들어, 비유전율이 약 1인 공기 중에서 640cm까지 측정한 신호는 비유전율이 4~6 인 건조한 모래의 경우 약 261~320cm, 비유전율이 25정 도인 포화된 모래의 경우는 약 128cm까지의 신호에 해 당한다(Table 1 참고).

안테나의 지향성 평가는 근거리장 영역의 경계 설정, 근거리장 및 원거리장 영역에서의 방사패턴 측정으로 이루어진 두 단계를 통하여 수행하였다. E-평면 및 H-평면에 대한 안테나 지향성 평가 실험의 구성을 Fig. 4(a) 와 Fig. 4(b)에 나타내었다. Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)는 각각 지향성 평가 실험의 구성에 대한 평면도와 정면도를 나 타낸다. 해당 지향성 평가를 위한 전자기파의 반사파 측 정 시 안테나의 높이는 지면으로부터 원형의 금속봉 높 이의 절반인 165cm로 유지하였다.

안테나의 E-평면 및 H-평면에 대하여 근거리장 및 원 거리장 영역의 경계를 설정하고자, 안테나와 반사체가 이루는 각도 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°로 이루어진 총 7개의 각도에 대하여 반사체의 표면을 기준(0cm)으 로 640cm까지 10cm 간격으로 조절하며 반사파 신호 측 정 및 진폭의 변화를 조사하였다. 또한, 설정된 경계 거 리를 바탕으로 근거리장 및 원거리장 영역에서의 E-평 면 및 H-평면에 대한 방사 패턴을 조사하였다. 방사 패 턴 측정 시에는 안테나와 반사체 사이의 거리(L)를 고 정한 상태로 각도(θ) 0°부터 90°까지 5° 간격으로 안테나 를 회전시키며 신호를 측정하였다.

4. 실험 결과

4.1 반사파 측정

지하투과레이더 신호에 대한 분석과정의 예시로 안테 나와 반사체 사이의 거리가 640cm이고 E-평면 상의 각 도 0°에서 측정한 신호를 Fig. 5와 같이 나타내었다. 여기 서, 최대 도달 시간 50ns 동안 측정된 전체 신호의 진폭 은 직접 결합 신호의 최대 진폭을 기준으로 정규화하였 으며 +1부터 -1까지의 범위를 가진 상대적 진폭(relative amplitude) 분포로 나타내었다. 지하투과레이더 신호는 도달 시간이 증가함에 따라 진폭이 급격하게 감쇠하므 로 반사체에서 반사된 신호를 구분하기 어려울 수 있다. 즉, Fig. 5(a)와 같이 원 신호(raw signal)에서는 반사파



Fig. 4. Schematic drawing of GPR directivity tests: (a) top view of directivity test; (b) side view of directivity test. θ denotes the angle between the antenna and the reflector.



Fig. 5. GPR signal gathered at L = 640 cm on E-plane (θ = 0°): (a) raw signal; (b) amplified signal by gain function

에서 반사된 신호의 구분이 명확하지 않으므로, Fig. 5(b) 와 같이 원 신호에 대하여 이득 함수 기법을 적용함으로 써 반사파 신호의 도달시간과 위상을 명확하게 해석할 수 있다. 본 연구에서는 도달 시간 0, 12.5, 25, 37.5, 50ns 에 해당하는 다섯 개의 도달 시간 지점을 설정하고 각각 -20, 11, 17, 17, 30dB의 이득값을 지정하였다. 도달 시 간 지점 사이의 이득값은 각 지점의 이득값에 대하여 보간법을 적용하여 전체 도달 시간에 대한 이득 함수를 설정하였으며, 측정된 신호에 대하여 이득 함수를 적용 하였다. 이득 함수가 적용된 Fig. 5(b)의 신호를 살펴보 면, 직접 결합 신호는 2.6ns에 측정되었으며 이후 45.2ns 에 강한 진폭의 반사파 신호가 측정되었다. 지하투과레 이더 신호는 직접 결합 신호와 반사파의 도달 시간 차이 를 이용하여 높은 정확도로 반사체까지의 거리를 산정 할 수 있는 것으로 알려져 있다(Viriyametanont et al., 2008). 직접 결합 신호와 강한 진폭의 반사파 신호 간의 도달 시간 차이는 42.6ns 이므로 공기의 비유전율 값(& ≃ 1)과 식 (3)에 대입하면 안테나와 반사체 사이의 거 리는 약 639cm으로 산정되며 이는 실제거리 640cm와 거의 동일하다. 또한 두 신호는 동일한 위상을 나타내므 로 45.2ns의 신호는 원형의 금속봉에서 반사된 신호로 간주할 수 있다. 원형의 금속봉에서 반사된 것으로 구분 된 신호에 대하여 Fig. 5(a)와 같이 이득 함수가 적용되 지 않은 원 신호의 최고점 간 진폭(signal amplitude)을 해당 거리, 각도에서의 진폭으로 간주할 수 있다.

4.2 안테나에 대한 영역의 경계 설정

안테나에 대한 영역의 경계 실험을 통하여 안테나와 반사체가 이루는 각도 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°에 서의 안테나와 반사체 사이의 거리를 조절하며 거리에 따른 반사파의 진폭을 조사하였다. 각 각도에 대하여 L = 0cm에서 측정한 진폭을 기준으로 반사체와의 거리를 10cm 간격으로 조절하며 모든 거리에서의 진폭이 이루 는 비율을 구하였으며 식 (7)과 같이 산정하였다. 산정 된 진폭 비율(amplitude ratio)을 Fig. 6에 나타내었다.

Amplitude ratio = $\frac{\text{Relative amplitude at L}}{\text{Relative amplitude at L} = 0 \text{ cm}}$ (7)

Fig. 6과 같이 거리에 따른 진폭 비율은 모든 각도에 서 E-평면 및 H-평면에 대하여 거리 40cm까지 급격한 감소를 보였으며, 40cm에서는 비율이 0.1 수준에 머물 렀다. 본 연구에서는 거리에 따른 자기장 세기를 측정하 지 않았으므로 전기장과 자기장의 비례관계는 평가할 수 없었으나 급격한 감소를 보인다는 경향을 통하여 리 액티브성 근거리장 영역의 경계(Lre)는 40cm 정도일 것 으로 판단된다. 본 연구에서 사용된 안테나의 경우 공기 중에서의 파장이 75cm이고 식 (5)를 이용하여 산정한 공기 중에서의 리액티브성 근거리장 영역의 경계에 대 한 최소거리는 11.9cm에 해당한다. 리액티브성 근거리 장의 경계가 이론상의 최소거리보다 크게 산정되었으 며, 이는 영역의 경계가 이론상의 최소거리보다 크거나 같다는 기존의 연구내용에 부합한다. Table 1과 같이 공 기의 비유전율이 1이고 지반의 비유전율이 약 9인 경우, 지반에서의 파장은 25cm이므로 비유전율이 9인 지반에 서의 리액티브성 근거리장 영역의 경계는 약 13.3cm일 것으로 판단된다.

안테나로부터 리액티브성 근거리장 영역에 해당하는 거리인 40cm 이후, 반사파는 Fig. 6과 같이 E-평면 및 H-평면 모두 진폭 비율 0.15 이하의 작은 상대적 진폭이 측정되었으며 거리가 멀어짐에 따라 지속적으로 감소 하는 경향을 보였다. 또한 Fig. 6과 같이 최소 160cm(θ = 75°의 E-평면), 최대 240cm(θ = 15°의 H-평면 또는 q = 30°의 E-평면)의 거리까지의 신호는 진폭의 변동을 보였다. 이와 같은 이유로 진폭의 변동이 나타나는 거리 의 최댓값인 240cm를 근거리장 영역의 경계로 판단하 였다. 본 연구에서 사용한 안테나의 공기 중에서의 파장



Fig. 6. Results of GPR directivity tests: (a) $\theta = 0^{\circ}$; (b) $\theta = 15^{\circ}$; (c) $\theta = 30^{\circ}$; (d) $\theta = 45^{\circ}$; (e) $\theta = 60^{\circ}$; (f) $\theta = 75^{\circ}$; (g) $\theta = 90^{\circ}$. L_{re} denotes the distance of the reactive near field from the antenna. L_{rad}(E) and L_{rad}(H) denote the distance of radiative near field measured on E-plane and H-plane, respectively.

이 75cm이고 식 (6)을 이용하여 산정한 공기 중에서의 근거리장 영역의 경계에 대한 이론적인 최소거리는 225cm 이므로, 리액티브성 근거리장의 영역과 마찬가지로 실 혐으로 산정한 근거리장 영역의 경계에 대한 이론상의 최소거리보다 더 크게 나타났다. Table 1과 같이 공기의 비유전율이 1이고 지반의 비유전율이 약 9인 경우 비유 전율이 9인 지반에서의 근거리장 영역의 경계는 약 80cm 일 것으로 판단된다. 원거리장 영역에 해당하는 공기 중 240cm 이후의 신호는 Fig. 6과 같이 모든 각도에 대하 여 진폭이 안정화된 모습을 보였으나, 거리 증가에 따른 진폭의 지속적인 감소로 인하여 대부분의 신호에서 진 폭 비율이 0.05 미만으로 나타났다.

4.3 영역에 따른 방사 패턴

본 연구에서 사용한 작동주파수 400MHz 안테나의 근거리장 영역의 경계는 240cm로 분석되므로, 근거리 장 영역에 해당하는 80cm와 160cm 지점 및 원거리장



Fig. 7. Radiation pattern based on the ratio of the amplitudes of all the angles measured every 5° to the amplitude at 0° in decibels at different distances: (a) 80 cm (near field); (b) 160 cm (near field); (c) 320 cm (far field); (d) 640 cm (far field). Shaded area denotes the minor lobe.

영역에 해당하는 320cm와 640cm 지점에서 방사 패턴 을 측정하여 근거리장 및 원거리장 영역에서의 지하투 과레이더의 지향성을 조사하였다. 각도 0°에서 측정된 반사파의 진폭을 기준으로 각 각도에서 측정된 진폭 비 율을 Fig. 7과 같이 데시벨(dB) 단위를 이용하여 극좌표 계에 나타내었으며, 극좌표계의 270°부터 360°까지 해 당하는 신호는 0°부터 90°까지의 신호를 대칭시킴으로 써 나타내었다. Fig. 7(a) 및 Fig. 7(b)은 각각 근거리장 에 해당하는 거리 80cm와 160cm에서 측정된 방사 패턴 이며 Fig. 7(c) 및 Fig. 7(d)는 각각 원거리장에 해당하는 거리 320cm와 640cm에서 측정된 방사 패턴이다.

Fig. 7(a)에 나타낸 거리 80cm에서 측정된 E-평면에 대한 방사 패턴의 경우, 0°~45°(315°~360°)구간과 45°~90° (270°~315°) 구간에서 명확한 돌출부가 측정되었으며, 이 는 안테나의 엽인 것으로 판단된다. 거리 80cm에서 측 정된 H-평면에 대한 방사 패턴의 경우, 0°~50°(310°~360°) 구간과 50°~90°(270°~310°) 구간에서 엽이 나타났다. Fig. 7(b)에 나타낸 거리 160cm에서 측정된 E-평면 및 H-평 면에서 방사 패턴의 경우, E-평면은 0°~55°(305°~360°) 구간과 55°~90°(270°~305°) 구간, H-평면은 0°~50°(310°~ 360°) 구간과 50°~90°(270°~310°) 구간에서 엽이 측정되 었다. 근거리장 영역에 해당하는 거리 80cm와 160cm에 서의 방사 패턴은 E-평면 및 H-평면 모두 엽이 두 방향 에 대하여 나타났으며, 수직 하방향(0°)를 포함한 엽이 주엽, 포함하지 않은 엽이 부엽인 것으로 판단된다. Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)에 나타낸 방사 패턴을 고려할 때 Fig. 7(a)에서 E-평면의 45°~90°(270°~315°) 구간과 H-평면의 50°~90°(270°~310°) 구간, Fig. 7(b)에서 E-평면의 55°~ 90°(270°~305°) 구간과 H-평면의 50°~90°(270°~310°) 구간 에 나타난 비교적 윤곽이 확실한 돌출부는 부엽인 것으로 판단된다. 근거리장 영역에 해당하는 거리 80cm와 160cm 모두 부엽이 나타났으므로 근거리장 영역에서는 안테나 가 주엽 방향뿐만 아니라 부엽 방향에 대해서도 지향성 을 보일 것으로 판단된다. 반면, 거리 320cm와 640cm 에서의 방사 패턴은 Fig. 7(c) 및 Fig. 7(d)와 같이 단일 방향에 대하여 엽이 측정되었다. 즉, 부엽은 측정되지 않 고 주엽만이 존재하므로 원거리장 영역에서는 안테나가 주엽 방향에 대해서만 지향성을 보일 것으로 판단된다.

4.4 각도에 따른 반사파 진폭 비교

근거리장 영역에서의 부엽은 Fig. 7(a) 및 Fig. 7(b)와

같이 E-평면 및 H-평면 모두 최소 50° 이상의 구간에서 나타났다. 해당 부엽 방향에서 안테나와 반사체의 거리 에 따른 반사파의 진폭 변화를 평가하고자 각도 60°, 75° 및 90°에 대하여 거리에 따른 반사파를 측정하였으며, 각도 0° 및 거리 0cm에서 측정된 반사파의 진폭을 기준 으로 정규화한 반사파의 진폭을 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 정규화된 진폭이 1에 가까울수록 반사체가 부엽 방향에 위치하더라도 주엽 방향에 위치하는 것과 같이 큰 진폭으로 측정됨을 의미한다. 본 연구에서는 정 규화된 진폭이 0.6 이상의 값을 나타낼 때, 반사체가 주 엽 방향뿐만 아니라 부엽 방향에 존재하더라도 큰 진폭 이 측정되므로 안테나를 통하여 반사체가 검측될 가능 성이 높을 것으로 판단하였다. 분석 결과 E-평면, H-평 면 모두 최대 거리 270cm까지 정규화된 진폭이 0.6 이 상의 값을 갖는 것으로 나타났다. 즉, 본 연구에서 설정 한 공기 중 근거리장 영역의 경계가 240cm임을 고려할 때, 근거리장 영역에서는 반사체가 주엽 방향뿐만 아니



Fig. 8. Normalized relative amplitude ratio of minor lobe to main lobe with different angles between the antenna and the reflector ($\theta = 60^{\circ}, 75^{\circ}$, and 90°): (a) E-plane: (b) H-plane. Shaded area denotes the range of distances that the normalized relative amplitude shows a value of 0.6 or more

라 부엽 방향에 위치하더라도 큰 진폭으로 측정될 수 있음을 의미한다.

5. 분석 및 토의

5.1 최대 투과 깊이에 대한 근거리장 영역

본 연구에서 사용된 작동주파수 400MHz 안테나의 경우 건조하고 점토 함유량이 높은 지반에서 최대 투과 깊이가 약 200cm에 해당하는 것으로 보고된 바 있다 (Trinks et al., 2013). 비유전율이 2~6의 값을 나타내는 점토 지반의 경우(Table 1 참고) 근거리장 영역의 경계 는 약 98.0~169.7cm이므로 지하투과레이더 탐사로부터 검측될 수 있는 이상구간은 대부분 근거리장 영역 내에 존재하며 일부 원거리장 영역 내에도 존재하는 것으로 판단된다. 이와 같이 지하투과레이더 탐사의 경우, 측정 된 신호는 대부분 안테나의 근거리장 영역에서 반사된 신호이며(Valle et al., 2001), 지반의 상황에 따라 원거 리장 영역에서 반사된 신호 또한 측정될 수 있는 것으로 알려져 있다. 즉, 본 연구에서 수행한 근거리장 및 원거 리장 영역의 구분 및 영역 내 안테나 지향성에 대한 분 석 내용은 실제 탐사 시 필수적으로 고려해야 하는 사항 인 것으로 판단된다.

5.2 측정된 엽에 따른 반사파 신호의 진폭

지하투과레이더는 탐사 거리에 따라 지반 내 반사체 로부터 반사된 전자기파의 연속적인 분포를 영상화하 며(Bruschini et al., 1998), 영상화된 반사파의 형상을 바 탕으로 지반 내 이상구간을 평가한다. 그러나, 지하투과 레이더가 수집하는 반사파의 진폭은 안테나의 지향성 에 영향을 받으므로 영상화된 반사파 형상 또한 안테나 의 지향성에 영향을 받을 수 있다(Jiao et al., 2000).

이상구간에서 반사된 신호의 진폭이 매우 작을 경우, 영상화된 모습은 불분명한 형상을 띄게 되며 이상구간의 검측 가능성 또한 저하된다. 안테나가 주엽만이 존재하 여 단일 방향에 대하여 지향성을 보일 경우, 안테나와 이 상구간이 이루는 각도가 주엽에 포함되기 전까지는 강한 진폭의 신호가 측정되지 않는다. 반면 안테나가 주엽 및 부엽 모두 존재하여 두 방향에 대하여 지향성을 보일 경 우, 강한 진폭의 신호가 측정될 수 있는 각도의 유효범위 가 확대된다. 즉, 주엽뿐만 아니라 부엽도 이상구간의 검측에 활용할 수 있으므로 부엽의 존재는 이상구간이 검측될 가능성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

5.3 안테나 영역에 따른 이상구간 검측 가능성

지반 이상구간의 신호가 큰 진폭으로 측정될 경우, 해당 각도는 이상구간의 검측이 가능한 각도의 유효범 위에 해당한다. 주엽과 부엽이 모두 존재 할 경우 부엽 방향까지 유효범위에 포함되므로, 주엽만 존재하는 경 우에 비하여 유효범위가 증가하는 것으로 판단된다. 본 연구에서 수행한 실험 결과, 근거리장 영역에서는 주엽 과 더불어 정규화된 진폭 0.6 이상의 큰 진폭으로 반사 체를 검측할 수 있는 부엽 또한 나타나 각도의 유효범위 가 넓었으며, 반사파의 진폭이 불안정한 모습을 보였으 나 진폭이 크게 측정되어 잡음과 구분할 수 있었다. 반 면 원거리장 영역에서는 주엽만이 나타나 상대적으로 각도의 유효범위가 좁았으며, 반사파의 진폭은 안정적 으로 측정되었으나 작은 진폭으로 인하여 잡음과의 구 분이 명확하지 않았다. 이상구간이 안테나 근거리장 영 역 내에 존재할 경우, 측정 신호의 진폭이 다소 불안정 하게 나타날 수는 있으나 잡음과 구분이 가능하여 평가 의 신뢰도가 높으며 이상구간이 검측될 가능성 또한 높 을 것으로 판단된다. 반면 이상구간이 안테나 원거리장 영역 내에 존재할 경우, 측정 신호의 진폭이 미약하여 잡음과의 구분이 어려워 평가의 신뢰도가 낮으며 이상 구간이 검측될 가능성 또한 낮을 것으로 판단된다.

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 안테나의 근거리장 및 원거리장의 경 계를 평가하고 각 영역에서의 지향성에 대한 변화양상 을 분석하여 지하투과레이더를 이용한 이상구간 평가 시 해석의 신뢰도를 향상시키고자 하였다. 본 연구를 위 하여 작동주파수 400MHz인 차폐식 안테나가 적용되었 으며 높이 330cm, 직경 8cm인 원형의 금속봉을 반사체 로 사용하였다. 안테나와 반사체가 이루는 각도 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°에 대하여 안테나와 반사체 사이의 거리를 0cm부터 640cm 까지 10cm 간격으로 조절 및 반사파의 진폭을 측정하였다. 이를 통하여 안테나에 대 한 근거리장 영역의 경계를 조사하였으며, 근거리장 및 원거리장 영역에서 안테나와 반사체가 이루는 각도를 5° 간격으로 변화시키며 반사파를 수집 및 방사 패턴을 조사하였다. 방사 패턴 결과로부터 반사체 거리에 따른 주엽 및 부엽을 평가하였으며, 반사체 거리에 따른 주엽 및 부엽에서 측정되는 진폭의 크기를 조사하였다. 본 연 구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 반사파 분석 결과, 모든 각도에서 동일하게 반사체 와의 거리 40cm까지 진폭의 급격한 감소를 보인 이 후 최대 240cm까지 진폭의 변동을 보였으며 240cm 이후에는 모든 각도에서 안정화된 모습으로 나타났 다. 즉, 본 연구에서 사용된 작동주파수 400MHz 안 테나의 리액티브성 근거리장 영역의 경계는 40cm 부근이며, 근거리장 영역의 경계는 약 240cm인 것 으로 나타났다.
- (2) 240cm으로 나타난 근거리장 영역의 경계를 기준으로 근거리장과 원거리장 각 영역에 대하여 서로 거리가 다른 2개의 지점을 설정하여 총 4개의 지점에 서의 방사 패턴을 조사한 결과, 근거리장 영역에 해당하는 거리인 80cm 및 160cm 모두 E-평면 및 H-평면에서 50° 이상의 구간에서 부엽이 나타나 주엽방향과 더불어 부엽 방향에 대해서도 강한 지향성을 보이는 것으로 나타났다. 반면 원거리장 영역에 해당하는 두 지점인 거리 320cm 및 640cm에서는 E-평면 및 H-평면 모두 부엽은 나타나지 않았으며 각도 0°를 중심으로 주엽만이 나타나 단일 방향에 대한 지향성을 보였다.
- (3) 근거리장 영역에서 반사된 신호는 안테나가 이동함 에 따라 진폭의 변동을 보이긴 하나 반사파 신호와 잡음을 구분하기 용이하여 반사체 평가의 신뢰도가 높을 것으로 판단된다. 반면 원거리장 영역에서는 진폭이 안정된 모습을 보이긴 하나 반사파 신호와 잡음을 구분하기 어려우므로 반사체 평가의 신뢰도 가 낮을 것으로 판단된다.
- (4) 부엽이 존재하는 경우는 존재하지 않는 경우에 비하여 보다 넓은 각도의 범위에 대하여 강한 진폭의 신호가 측정된다. 즉, 부엽의 존재로 인하여 주엽 방향 및 부엽 방향 모두에 대하여 지향성을 보일 경우 각도의 유효범위가 넓어져 이상구간이 검측될 가능성이 높아짐을 알 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2015년 정부(미래창조과학부)의 재원으로

국가과학기술연구회 융합연구단 사업(No. CRC-14-02-ETRI)의 지원을 받아 수행된 연구임.

이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으 로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 임(No. NRF-2017R1A2B3008466).

참고문헌 (References)

- Ahmed, A., Zhang, Y., Burns, D., Huston, D., and Xia, T. (2016), "Design of UWB Antenna for Air-coupled Impulse Ground-penetrating Radar", *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol.13, No.1, pp.92-96.
- Annan, A. P. (2003), "Ground Penetrating Radar Principles, Procedures, and Applications", Sensors and Software. Inc., pp.293.
- Arcone, S. A., Spikes, V. B., Hamilton, G. S., and Mayewski, P. A. (2004), "Stratigraphic Continuity in 400 MHz Short-pulse Radar Profiles of Firn in West Antarctica", *Annals of Glaciology*, Vol.39, No.1, pp.195-200.
- ASTM D6432-11 (2011), "Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation", *Annual Book of ASTM Standard*, Vol.4, No.9.
- Bialkowski, M. E. and Wang, Y. (2009), "A Size-reduced Exponentially Tapered Slot Antenna with Corrugations for Directivity Improvement", *In Microwave Conference*, 2009, pp.2482-2485.
- Bruschini, C., Gros, B., Guerne, F., Piece, P. Y., and Carmona, O. (1998), "Ground Penetrating Radar and Imaging Metal Detector for Antipersonnel Mine Detection", *Journal of Applied Geophysics*, Vol.40, No.1, pp.59-71.
- Choi, S. O., Jeon, Y. S., Park, E. S., Jung, Y. B., and Chun, D. S. (2005), "Analysis of Subsidence Mechanism and Development of Evaluation Program", *Journal of Korean Society For Rock Mechanics*, Vol.15, No.3, pp.195-212.
- 8. Daniels, D. J. (2004), "Ground Penetrating Radar", Iet, pp.726.
- Davis, J. L. and Annan, A. P. (1989), "Ground Penetrating Radar for High Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy", *Geophysical Prospecting*, Vol.37, No.5, pp.531-551.
- De Jongh, R. V., Ligthart, L. P., Kaploun, I. V., and Schukin, A. D. (1999), "Design and Analysis of New GPR Antenna Concepts", Tijdschrift-Nederlands Elektronica En Radiogenootschap, 64, pp.26-32.
- Everett, M. E. (2013), "Near-surface Applied Geophysics", Cambridge University Press, p.403.
- Evinemi, I. E., Adepelumi, A. A., and Adebayo, O. (2016), "Canal Structure Subsidence Investigation Using Ground Penetrating Radar and Geotechnical Techniques", *International Journal of Geo-Engineering*, Vol.7, No.1, pp.1-14.
- Geophysical Survey Systems, Inc. (2012), "RADAN 7", GSSI, p.133.
- Hong, W. T., Kang, S., and Lee, J. S. (2015), "Application of Ground Penetrating Radar for Estimation of Loose Layer", *Journal* of the Korean Geotechnical Society, Vol.31, No.11, pp.41-48.
- Jiao, Y., McMechan, G. A., and Pettinelli, E. (2000), "In Situ 2-D and 3-D Measurements of Radiation Patterns of Half-wave Dipole GPR Antennas", *Journal of Applied Geophysics*, Vol.43, No.1, pp. 69-89.

- Jol, H. M. (2008), "Ground Penetrating Radar Theory and Applications", Elsevier, p.544.
- 17. Kleiner, M. (2013), "Electroacoustics", CRC Press, pp.628.
- Kwak, P. J., Park, S. H., Choi, C. H., and Lee, H. D. (2015), "Safety Monitoring Sensor for Underground Subsidence Risk Assessment Surrounding Water Pipeline", *Journal of Sensor Science and Technology*, Vol.24, No.5, pp.306-310.
- Markovaara-Koivisto, M., Hokkanen, T., and Huuskonen-Snicker, E. (2014), "The Effect of Fracture Aperture and Filling Material on GPR Signal", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol.73, No.3, pp.815-823.
- Mikhnev, V. and Vainikainen, P. (2003), "Wideband Tapered-slot Antenna with Corrugated Edges for GPR Applications", 2003 33rd European, 727-729.
- Millard, S. G., Shaari, A., and Bungey, J. H. (2002), "Field Pattern Characteristics of GPR Antennas", NDT & E International, Vol.35, No.7, pp.473-482.
- Pérez-Gracia, V., Di Capua, D., González-Drigo, R., Caselles, O., Pujades, L. G., and Salinas, V. (2010), "GPR Resolution in Cultural Heritage Applications. In ground Penetrating Radar (GPR)", 2010 13th International Conference on. IEEE, pp.1-5.
- Rial, F. I., Lorenzo, H., Pereira, M., and Armesto, J. (2009), "Waveform Analysis of UWB GPR Antennas", Sensors, Vol.9, No.3, pp.1454-1470.
- 24. Rodríguez, V., Gutiérrez, F., Green, A. G., Carbonel, D., Horstmeyer, H., and Schmelzbach, C. (2014), "Characterizing Sagging and Collapse Sinkholes in a Mantled Karst by Means of Ground Penetrating Radar (GPR)", *Environmental & Engineering Geoscience*, Vol.20, No.2, pp.109-132.
- Rudge, A. W. (1983), "The Handbook of Antenna Design", Iet, 945.
- 26. Salako, A. O. and Adepelumi, A. A. (2016), "Evaluation of Hydraulic Conductivity of Subsoil Using Electrical Resistivity and Ground Penetrating Radar Data: Example from Southwestern Nigeria", *International Journal of Geo-Engineering*, Vol.7, No.1, p.5.
- 27. Smitha, N., Bharadwaj, D. U., Abilash, S., Sridhara, S. N., and

Singh, V. (2016), "Kirchhoff and FK Migration to Focus Ground Penetrating Radar Images", *International Journal of Geo-Engineering*, Vol.7, No.1, p.4.

- Stutzman, W. L. and Thiele, G. A. (2012), "Antenna Theory and Design", John Wiley & Sons, p.822.
- 29. Thitimakom, T., Kampananon, N., Jongjaiwanichkit, N., and Kupongsak, S. (2016), "Subsurface Void Detection under the Road Surface Using Ground Penetrating Radar (GPR), a Case Study in the Bangkok Metropolitan Area, Thailand", *International Journal of Geo-Engineering*, Vol.7, No.1, p.2.
- Trinks, I., Fischer, P., Löcker, K., and Flöry, S. (2013), "Hala Sultan Tekke revisited–archaeological GPR prospection on Cyprus 1980 and 2010/12", *10th International Conference on Archaeological Prospection*, pp.285-287.
- Valle, S., Zanzi, L., Sgheiz, M., Lenzi, G., and Friborg, J. (2001), "Ground Penetrating Radar Antennas: Theoretical and Experimental Directivity Functions", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol.39, No.4, pp.749-759.
- 32. Viriyametanont, K., Laurens, S., Klysz, G., Balayssac, J. P., and Arliguie, G. (2008), "Radar Survey of Concrete Elements: Effect of Concrete Properties on Propagation Velocity and Time Zero", NDT & E International, Vol.41, No.3, pp.198-207.
- Wang, Y. W., Wang, G. M., and Zong, B. F. (2013), "Directivity Improvement of Vivaldi Antenna Using Double-slot Structure", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 12, pp.1380-1383.
- 34. Warren, C. and Giannopoulos, A. (2012), "Investigation of the Directivity of a Commercial Ground-penetrating Radar Antenna Using a Finite-difference Time-domain Antenna Model", 2012 14th International Conference, pp.226-231.
- Yaghjian, A. (1986), "An Overview of Near-field Antenna Measurements", *IEEE Transactions on antennas and propagation*, Vol.34, No.1, pp.30-45.

Received : July 24th, 2017 Revised : September 27th, 2017 Accepted : October 12th, 2017