

ORIGINAL ARTICLE

## 지하 환경 감시를 위한 자기공명 기반 모니터링 방법의 타당성 연구

류동우<sup>1\*</sup>, 이기송<sup>2</sup>, 김은희<sup>3</sup>, 염병우<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원, <sup>2</sup>충북대학교, <sup>3</sup>한국전자통신연구원

# A experimental Feasibility of Magnetic Resonance Based Monitoring Method for Underground Environment

Dong-Woo Ryu<sup>1\*</sup>, Ki-Song Lee<sup>2</sup>, Eun-Hee Kim<sup>3</sup>, and Byung-Woo Yum<sup>1</sup>

<sup>1</sup>KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)

<sup>2</sup>Chungbuk National University

<sup>3</sup>ETRI (Electronics and Telecommunications Research Institute)

\*Corresponding author: [dwryu@kigam.re.kr](mailto:dwryu@kigam.re.kr)

Received: October 15, 2018

Revised: December 6, 2018

Accepted: December 10, 2018

### ABSTRACT

As urban infrastructure is aging, the possibility of accidents due to the failures or breakdowns of infrastructure increases. Especially, aging underground infrastructures like sewer pipes, waterworks, and subway have a potential to cause an urban ground sink. Urban ground sink is defined just as a local and erratic collapse occurred by underground cavity due to soil erosion or soil loss, which is separated from a sinkhole in soluble bedrock such as limestone. The conventional measurements such as differential settlement gauge, inclinometer or earth pressure gauge have a shortcoming just to provide point measurements with short coverage. Therefore, these methods are not adequate for monitoring of an erratic subsidence caused by underground cavity due to soil erosion or soil loss which occurring at unspecified time and location. Therefore, an alternative technology is required to detect a change of underground physical condition in real time. In this study, the feasibility of a novel magnetic resonance based monitoring method is investigated through laboratory tests, where the changes of path loss (S21) were measured under various testing conditions: media including air, water, and soil, resonant frequency, impedance, and distances between transmitter (TX) and receiver (RX). Theoretically, the transfer characteristic of magnetic field is known to be independent of the density of the medium. However, the results of the test showed the meaningful differences in the path loss (S21) under the different conditions of medium. And it is found that the reflection coefficient showed the more distinct differences over the testing conditions than the path loss. In particular, input reflection coefficient (S11) is more distinguishable than output reflection coefficient (S22).

**Keywords:** Magnetic resonance, Urban ground sink, Real-time-areal monitoring, Path loss, Reflection coefficient

### 초록

도시 기반시설이 노후화됨에 따라 도시 재난 발생 가능성이 증가하고 있다. 특히, 하수관로, 상수도관망, 지하철 등 노후화된 지하 시설물은 도심지 지반함몰을 유발하는 잠재적 원인이 된다. 도심지 지반함몰은 토양 침식 혹은 유실로 인해 생성된 지하 공동이 확장하여 지역적이고 갑작스런 지반 붕괴까지 이르는



현상으로 정의할 수 있다. 이는 석회암과 같은 용해성 암반에서 발생하는 싱크홀과는 구분된다. 지반 거동과 관련된 전통적인 계측 방식은 좁은 측정 범위와 각 센싱 지점에서의 계측값을 제공하기 때문에 불특정 다수 지역에서 발생할 수 있는 지반함몰 감시체계로서 한계가 있다. 따라서, 도시에 발생하는 지하 공동에 의한 지반함몰을 예방하기 위한 감시체계로서는 적절하지 않으며 지반 내 물리적 환경변화를 감시할 수 있는 새로운 상시·영역 감시 기술이 필요하다. 본 연구에서는 비방사 유도 자기장(자기공명) 기반 감시 체계의 기술적 타당성을 실험적으로 검토하였다. 공기, 물, 흙 등 매질과 공진 주파수, 임피던스 그리고 송·수신기 거리 등과 같은 환경변수에 따른 경로 손실 변화를 측정하는 방식으로 이루어졌다. 이론적으로 자기장의 전달 특성은 매질의 밀도와 독립된 것으로 알려졌으나, 실험 결과 매질의 조건에 따라 경로 손실에 의미있는 차이를 보이는 것으로 나타났다. 또한, 매질의 물리적 환경변화에 따라 경로손실보다는 반사계수가 명확한 차이를 보였으며, 입력 반사계수가 출력 반사계수에 비해 보다 판별이 용이한 것으로 나타났다.

**핵심어:** 자기 유도, 지반함몰, 실시간 영역 감시, 경로 손실, 반사 계수

## 1. 서론

사회현안 문제로 대두되고 있는 도심지 지반함몰(ground sink)은 발생 형태는 석회암지대에서 발생하는 싱크홀과 유사하나 발생기작(mechanism)은 큰 차이가 있으며, 압밀현상인 지반침하와도 발생 형태 및 발생기작 측면 모두 차이가 있다(Table 1). 지반함몰은 토양 침식 혹은 유실로 생성된 지하 공동의 발생, 확장, 지반 혹은 포장재 붕괴의 과정으로 발생하며, 지하 공동의 발생의 조건으로는 흙으로 이루어진 지반, 흙을 이동시킬 수 있는 포텐셜 그리고 이동된 흙이 쌓일 수 있는 공간 등 세 가지로 제시할 수 있다.

**Table 1.** Classification of subsidence

Classification	Procedures	Factors
Ground sink	Initiation (suffusion/suffosion) Continuation (grain migration) Progression (cavity creation) Expansion Breach (failure)	Compaction, grain size distribution, groundwater etc.
Sinkhole	Interaction between bed rock and groundwater (limestone, carbonate rock, salt bed etc.) Chemical weathering in long-term chemical reaction dissolution creation of cavity Upward migration by progressive roof collapse	Soluble rocks, groundwater, discontinuities etc.
Consolidation	Stress (effective stress)-strain problem: 1st and 2nd consolidation (time-dependent)	Ground mechanical properties, load condition, groundwater etc.

세 가지 조건을 충족하는 지반 환경 변화 및 공동 생성은 발생 가능 범위가 매우 넓고, 오랜 기간 기작에 의해 불특정 시점 및 지역에서 발생한다. 현재까지 준용되고 있는 기본적인 대응 방안은 GPR에 의한 포장재 하부 공동 탐사, 공동 확인 시추, 포장재 근접 공동에 대한 채움공 등 일련의 과정으로 많은 예산과 시간이 소요된다. 따라서 보다 효율적이고 경제적인 방안으로서 지하 기반시설 노후 지역이나 대규모 터파기 현장 및 가시시설 주변 지역 등 지반 환경 변화가 예상되는 지역에 대한 연속적이고 영역적으로 감시할 수 있는 새로운 기술이 요구된다.

본 연구에서는 최근 무선전력전송 기술에서 채택되고 있는 자기공명방식 기술과 관련 이론을 살펴보고, 지반 환경 변화에 대한

상시·영역 감시체계로서의 활용가능성에 대한 기술적 타당성을 검증하고자 한다. 이를 위해 공기, 물, 흙 등 매질과 공진 주파수, 임피던스 그리고 송·수신 코일 안테나간 거리 등과 같은 안테나 변수에 따른 경로 손실 변화를 측정하는 방식으로 실내 실험을 수행하고, 경로손실 S21 및 반사계수 S11와 S22의 변화를 분석한다. 또한, 실험 결과로부터 상시·영역 감시체계로서의 자기공명 기반 체계 제원을 제시하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 무선전력전송 개요

최근 휴대용 전자기기의 수요가 늘어남에 따라 전자기기의 배터리 충전의 번거로움을 호소하는 고객이 늘어나고 있다. 이러한 흐름에 발맞추어 무선전력전송(wireless power transfer, WPT) 기술은 기존의 유선의 충전 방식을 벗어나 사용자의 충전 편의성을 증진시킬 수 있는 기술로 각광받고 있다. 무선전력전송은 크게 다음과 같이 3가지 방식으로 구분할 수 있다.

첫 번째는 전자파를 이용한 방사형(radiative) 전력전송방식이다(Brown, 1984; McSpadden & Mankins, 2002). 이 기술은 고효율의 지향성 안테나를 이용하여 높은 전력 밀도를 갖는 레이저 형태의 전자파(electromagnetic wave)를 생성하여 수십 km 이상의 장거리 전력전송에 이용된다. 하지만 주변 환경의 영향을 많이 받으며, 전력전송 구간에 장애물이 없는 LOS(line-of-sight) 조건이 만족되어야 높은 효율을 보장할 수 있다는 단점이 있다.

두 번째는 비방사형(non-radiative) 전력전송방식의 하나로 비접촉 코일 안테나 사이의 전자기 유도를 이용하는 전자기 유도(magnetic induction)방식이 있다(Hirai et al., 2000; Jang & Jovanovic, 2003). 이 기술은 송신 코일 안테나에 교류 전류가 흐르면 발생하는 자력선이 근접한 수신 코일 안테나에 전달되어, 전류와 전압을 유도하는 원리를 이용한 것이다. 전자기 유도 방식은 수 cm 이내의 짧은 거리에서만 사용이 가능하며, 송·수신 코일 안테나간 거리 및 상대적 위치에 민감하여 거리가 약간만 떨어지거나 틀어져도 전송 효율이 급감하는 단점이 있다.

세 번째는 비방사형 전력전송방식으로 송·수신 코일 안테나의 공진주파수를 일치시켜 높은 효율로 전력을 전송하는 자기공명(magnetic resonance)방식이다(Kurs et al., 2007; Karalis et al., 2008). 이 기술은 전자기 유도방식과 원리가 비슷하나 1~2 m 정도의 비교적 먼 거리의 무선전력전송을 할 수 있다. 또한, 비방사형 전자기 유도방식과 방사형 전자파 방식의 장점을 동시에 가지고 있어 전송거리나 효율 측면에서 비교적 실용적이기 때문에 최근 관심이 집중되고 있다.

### 2.2 자기공명 방식과 자기장 신호 특성

자기공명방식의 무선전력전송 시스템의 구조는 Fig. 1과 같으며, 이 시스템의 등가회로도 Fig. 2와 같다. 송신 코일 안테나에 교류 전압  $V_s(t)$ 를 걸어주면 이로 인해 교류 전류  $i_t(t)$ 가 발생한다. 송신 코일 안테나에 인가된 교류 전류는 전자기유도 법칙에 의해 자기장을 생성하게 되고, 이 자기장은 무선으로 수신 코일 안테나에 전달되어 다시 교류 전류  $i_r(t)$ 를 유도한다.

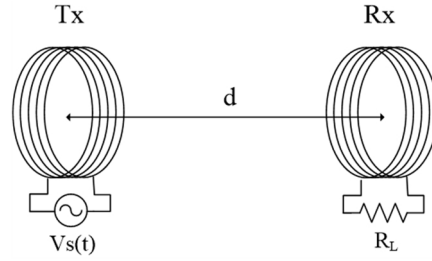


Fig. 1. System model for a magnetic resonant WPT system

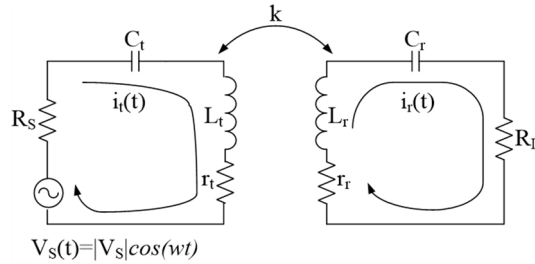


Fig. 2. Equivalent circuit of a magnetic resonant WPT system

수신 코일 안테나에서는 이 유도된 교류 전류를 정류하여 직류 형태로 만들고, 이를 전력 공급원으로 사용할 수 있다. 이때 자기 공명 방식의 경우 송·수신 코일 안테나 식 (1)과 같이 동일한 공진 주파수로 맞추면 높은 효율로 전력 전송이 가능하다.

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_t C_t}} = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} \tag{1}$$

일반적으로 송·수신 코일 안테나의 유도 결합 세기를 나타내는 커플링 계수  $k$ 는 다음과 같이 송·수신 코일 안테나의 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스의 식으로 나타낼 수 있다.

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_t L_r}} \tag{2}$$

또한, 상호 인덕턴스  $M$ 은 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$M = \frac{\pi \mu_0 N_t N_r \alpha_t^2 \alpha_r^2 |\cos \theta|}{2(\alpha_t^2 + d^2)^{3/2}} \tag{3}$$

식 (3)에서  $\mu_0$ 는 자유 공간에서의 투자율(magnetic permeability)이며,  $N_t$ 와  $N_r$ 은 각각 송·수신 코일 안테나의 감긴 횟수,  $\alpha_t$ 와  $\alpha_r$ 은 각각 송·수신 코일 안테나의 반지름,  $\theta$ 는 송·수신 코일 안테나가 이루는 각도이다. 커플링 계수  $k$ 은 거리  $d$ 가 늘어남에 따라  $1/d^3$ 에 비례하여 감소하는 특성이 있다. 또한, 수신 코일 안테나에서 측정되는 전력전송효율은 다음 식 (4)와 같이  $1/k^2$ 에 비례하여 감소한다(Sun & Akyildiz, 2010; Lee & Cho, 2013).

$$\eta = \frac{4\omega^2 L_t L_r R_S R_L k^2}{((R_S + r_t)(R_L + r_r) + \omega^2 L_t L_r k^2)^2} \tag{4}$$

즉, 자기장 신호의 크기는 거리가 늘어남에 따라  $1/d^6$ 에 비례하여 감소한다. 반면, 전자파 신호의 파워는  $1/d^2$ 에 비례하여 감소한다. 자유 공간에서 자기장이 전자파에 비해 단위 거리 당 감소하는 정도가 더 크지만, 전달 매질이 변하거나 진행 방향에 장애물이 존재하는 경우, 자기장은 전자파에 비해 신호 전달의 측면에서 큰 장점을 갖는다. 예를 들어, 전자파의 경우 진행하는 도중에 건물, 나무, 돌 등의 장애물을 만나면 대부분의 신호가 반사되거나 감소되지만, 자기장의 경우 신호 전달의 특성에서 큰 차이가 없다. 또한, 전자파는 자유 공간에서의 직진성은 좋지만, 전달 매질이 물이나 토양으로 바뀌는 경우 대부분의 전자파가 매질에 흡수되어 신호가 거의 전달되지 않는 문제점이 있다. 이러한 이유로 인해 지하 매립 환경에서 상시·영역 감시 체계를 구축하는 데에는 전자파를 이용한 기술보다는 자기장을 이용한 무선전력전송 기술이 더 적합할 수 있다.

두 공진기 사이에 유도되는 상호 인덕턴스(M)을 Neumann의 공식을 이용하면 다음 식 (5)로도 표현이 가능하다.

$$M = \frac{\mu}{4\pi} N_1 N_2 \oint \oint \frac{e^{-\gamma|r_2 - r_1|}}{|r_2 - r_1|} dl_1 \cdot dl_2 \tag{5}$$

여기서,  $\gamma = \sqrt{j\omega\mu\sigma} = (1 + j)\beta$ ,  $\beta = \sqrt{2\pi f\mu\sigma/2}$  이다. 수식에서 알 수 있듯이 두 공진기 사이의 상호 인덕턴스는 매질의 투자율( $\mu$ )뿐만 아니라 매질의 전도율( $\sigma$ )에도 영향을 받는 것을 알 수 있다. 또한, 주파수가 높아질수록 매질의 투자율과 전도율의 차이가 커져 매질에 따른 자기장 세기의 차이가 커짐을 예상할 수 있다.

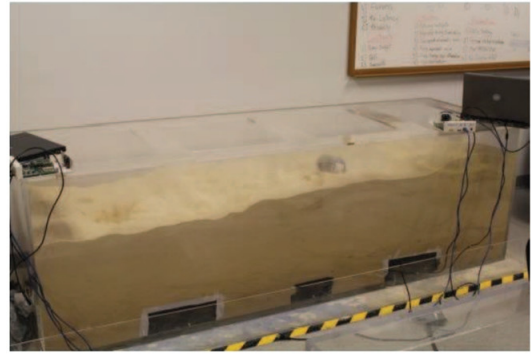
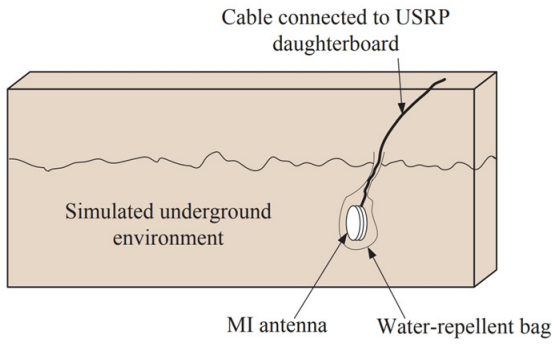
### 2.3 매질에 따른 자기장 신호 특성

일반적으로 자기장의 투자율은 자유 공간, 공기, 물, 토양 등에서 99% 이상 동일하다(Table 2). 즉, 송신 코일 안테나에서 수신 코일 안테나로 전달되는 자기장 신호의 세기는 매질에 관계없이 동일해야 한다. 하지만 전도율 측면에서는 공기와 다른 매질 간에 확연한 차이를 보인다. 이러한 매질간의 전도율의 차이로 인해 자기장이 진행하는 매질이 달라지면 자기유도 특성이 달라지고, 결과적으로 지반환경 변화를 감지할 수 있을 것으로 예상할 수 있다.

**Table 2.** Magnetic permeability and conductivity of various materials

Material	Magnetic permeability ( $\mu$ )	Conductivity ( $\sigma$ )
Air	Near to 1	$3\sim 8 \times 10^{-15}$
Water		0.01~0.5
Seawater		4.8
Soil (Depend on VWC)		0.005~0.3

매질에 따른 자기장 신호 특성과 관련한 연구로서 매질의 전도율 차이에 의해 수신되는 자기장 신호 세기가 공기 중에서 측정된 값과 차이가 있음을 확인한 바 있다(Fig. 3)(Tan et al., 2015; Askari et al., 2015).

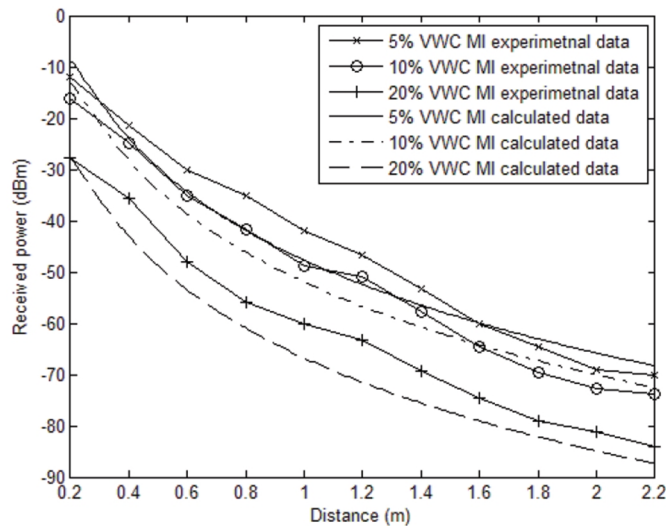


(a) MI coil deployment

(b) A photo of the in-lab underground environment

**Fig. 3.** MI coil deployment in the underground environment (Tan et al., 2015)

서로 다른 함수율(volume water contents, VWC)을 갖는 토양에서 거리에 따른 자기장 신호의 세기를 측정된 결과, 함수율이 클수록 자기장 신호의 세기가 작아짐을 확인할 수 있었다(Fig. 4). 또한, 함수율에 따른 자기장 세기는 10~20 dBm까지 큰 차이를 보였다. 또한, 공기(A)와 소금물(SW)에서의 주파수 대역에 따른 전력전송 효율의 비교 결과는 Table 3과 같다. 전도율이 다른 두 매질인 공기와 소금물에서 전력전송효율을 측정된 Tan et al.(2015)의 실험에서는 거리가 변함에 따라 20 kHz 주파수 대역에서 5% 이내의 차이를 보이며, 주파수 대역이 높아질수록 두 매질에서 측정된 효율 차이가 더 커지는 경향을 확인할 수 있다.



**Fig. 4.** Received signal strength in underground environment with different VWC (Tan et al., 2015)

**Table 3.** Comparison of power transfer efficiency at air and salt water over frequency range (Askari et al., 2015)

Distance	20		50		85		120	
	A	SW	A	SW	A	SW	A	SW
7.5 cm	81	80	78	65	62	25	32	12
15 cm	69	69	65	54	42	19	51	14
22.5 cm	42	38	53	44	43	17	30	10
30 cm	20	19	37	29	26	12	17	7



### 3. 자기장 신호 전달 특성 실험

#### 3.1 실험 개요

자기장 신호 전달 특성 실험을 위한 송·수신 코일 안테나는 리츠 와이어(Litz wire, NELD1725/48SPSN)를 피치 0.5 cm, 외부 지름 30 cm인 Spiral type 기구물에 6회 감아서 제작하였다. 주문진 표준사가 담긴 40×30×50 cm<sup>3</sup>의 박스형 기구물을 이용하여 매질을 구성하였다(Fig. 5). 또한, 본 실험에서는 매질 특성에 따른 전달계수 변화를 확인하고, 자기장 기반의 공동 센서를 구축할 때 가장 유리한 주파수 대역을 선정하고자 벡터 네트워크 분석기(Keysight사의 E5071C) 장비를 사용했다. 벡터 네트워크 분석기는 2-port 테스트 대상 장치(DUT, device under test)의 주파수에 대한 입력전압 대 출력전압의 비(S 파라미터)를 측정하기 위해 사용되는 장비이다.

송·신 코일 안테나(Tx 및 Rx)의 각 임피던스 측정 후, 자체 유도계수 L(inductance) 값에 대응되도록 전기용량 C(capacitance)를 조정하여 공진을 수행하였다. 공진된 조건에서 매질변화, 즉 실험환경 변화에 따라 입력전압(Tx) 대비 출력전압(Rx)의 비인 경로손실(path loss) S<sub>21</sub>을 측정하는 방식으로 자기공명 신호 전달 특성 실험을 수행하였다. 환경변수로는 주파수(4 MHz, 8 MHz, 12 MHz), 매질(공기, 표준사), 송·수신 코일 안테나간 거리 등을 고려하였다.

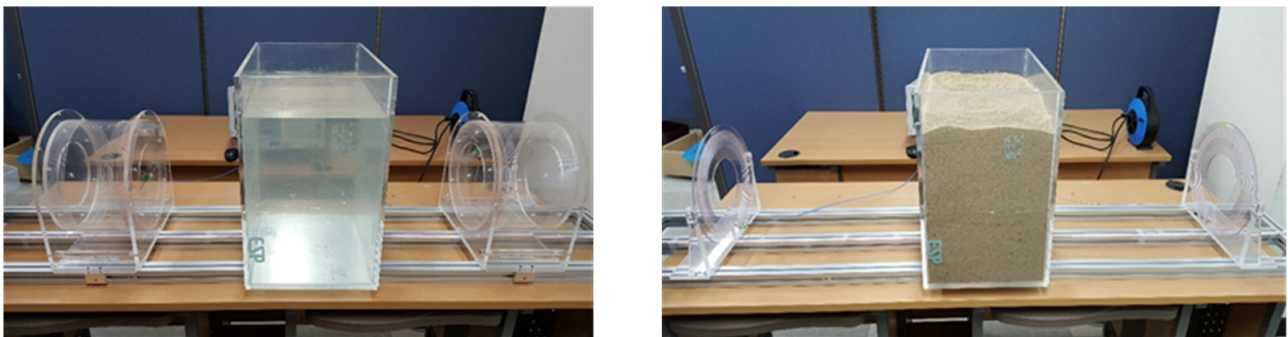


Fig. 5. Helical type coils and soil tank for the test

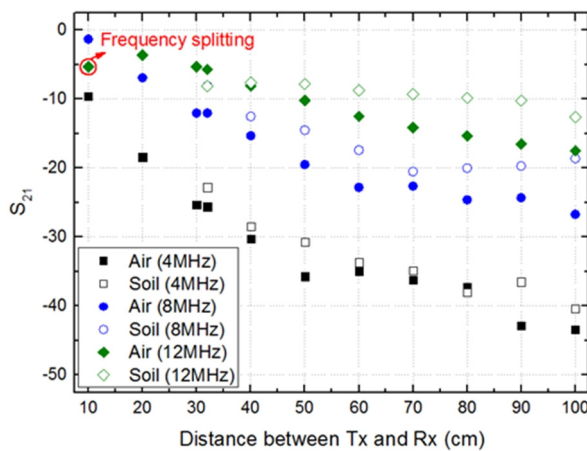


Fig. 6. S<sub>21</sub> parameter against distance between antenna coils, frequency and medium

공진시 송·수신 코일 안테나간 거리, 주파수, 매질에 따른 경로손실 S21은 Fig. 6과 같은 경향을 보였다. 거리가 늘어남에 따라 송신 코일 안테나에서 수신 코일 안테나로 전달되는 자기장의 양이 줄어들기 때문에 모든 환경에서 S21은 감소하였다. 또한, 주파수 영향 및 매질 종류에 따른 S21 차이를 확인할 수 있었다. 예를 들어 저주파수(4 MHz) 일 때 공기와 흙에서의 S21 차이가 줄어들며, 고주파수(12 MHz)로 갈수록 공기와 흙에서의 S21 차이가 커지는 경향을 보였다. 그러나, 이론적으로는 송·수신 코일 안테나 간 거리가 줄어들수록 흙을 통과하는 자기장의 비율이 커지며, 이로 인해 공기와 흙에서의 S21 차이가 커져야 한다. 하지만, 실험 결과에서는 오히려 송·수신 코일 안테나간 거리가 늘어날수록 차이가 커지는 현상을 확인하였다. 이 현상의 원인을 파악하기 위해서 이종 매질의 상대적 위치 변화를 통해 신호전달 특성 인자를 분석하였다.

### 3.2 이종 매질의 상대적 위치에 따른 신호 전달 특성 결과

실험을 통해 얻은 공진 상태에서 자기장 분포는 송·수신 코일 안테나 근처에 집중되는 것을 확인할 수 있다(Fig. 7).



Fig. 7. Distribution of magnetic fields for the magnetic resonant wireless power transfer (WPT)

자기장이 코일 안테나 주변에 모이는 사실을 근거로 ‘코일 안테나 주변에 표준사 박스를 위치시킬 때 측정된 S21이 공기 중에서 측정된 S21과 가장 큰 차이를 보일 것’이라는 가설을 세우고, 이를 실험을 통해 검증하고자 한다.

신호 전달 특성 비교를 위해 기준치로서 공기 중 S21과 이종매질로 설정한 토조 위치를 Fig. 8과 같이 변화시키면서 S21을 측정하였다.

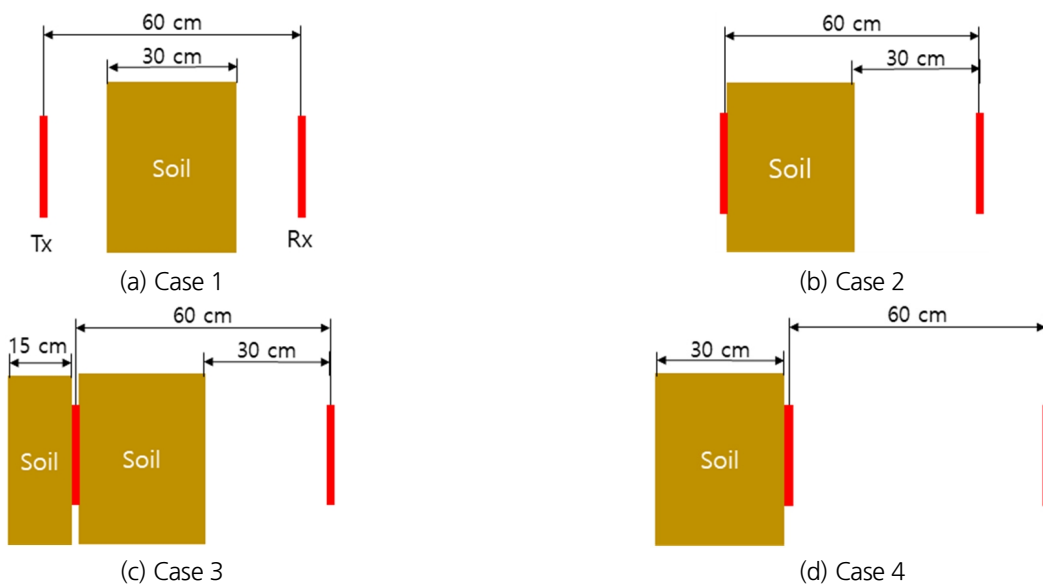


Fig. 8. Relative positions of soil tank to antenna coils

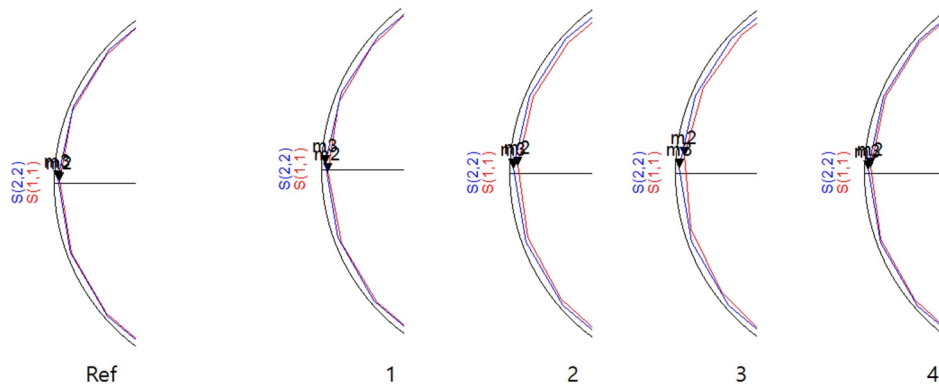


송·수신 코일 안테나간 거리는 60 cm로 고정하였으며, 각각  $40 \times 30 \times 50 \text{ cm}^3$ 와  $40 \times 15 \times 50 \text{ cm}^3$ 의 토조에 표준사를 채워서 이중 매질을 구성하였다. 또한, 공진 주파수를 맞추기 위해 코일 안테나의 자체 유도계수 L값에 따라 적합한 전기용량 C를 구하여 직렬로 연결하였다. Case 1은 안테나 사이의 중앙에 폭 30 cm의 토조를 위치시켰으며, Case 2는 송신 코일 안테나 바로 앞에 폭 30 cm의 토조를 위치시켰다. Case 3은 송신 코일 안테나 앞뒤로 폭 30 cm의 토조와 폭 15 cm의 토조를 각각 위치시켰으며, Case 4는 송신 코일 안테나 뒤에 폭 30 cm의 토조를 위치시켰다. 가설에 따라 상대 위치별로 측정된 S21과 기준 환경에서의 S21의 차이는 Case 3 > Case 2 > Case 4 > Case 1으로 나타나야 할 것이다.

또한, 공진 주파수의 영향을 살펴보기 위해서 서로 다른 4개의 공진 주파수 대역에서 S21을 이중 매질의 상대 위치별로 측정하였다. 실험 결과로부터 6.78 MHz에서는 가설과 동일한 결과를 보임을 확인할 수 있었으나, 4 MHz, 8 MHz, 12 MHz 등의 주파수에서는 가설과 동일하지 않은 결과를 보였다(Table 4). 이 원인을 파악하기 위해 스미스 차트(Smith chart) 상에서 송·수신 코일 안테나의 반사계수 S11과 S22를 확인하였다(Fig. 9~Fig. 10).

**Table 4.** S21 values according to relation position of soil tank and frequency

Frequency (MHz)	S21 (dBm)				Ref. (Air)
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	
6.78	-33.5	-28.7	-27.9	-31.1	-35.6
4	-41.8	-40.3	-38.9	-40.1	-40.3
8	-21.7	-17.6	-16.1	-18.8	-19.9
12	-7.8	-8.6	-8.1	-6.1	-7.4



**Fig. 9.** Variations of S11 and S22 parameters over distance at f=4 MHz

주파수 4 MHz에서 토조의 상대 위치에 따른 반사계수 S11과 S22의 변화량은 Fig. 9와 같다. 토조를 송신 코일 안테나에 가깝게 위치시켰으므로 S22에 비해 S11의 변화량이 상대적으로 크게 나타났다. 또한, 가설과 같이 기준 환경에서의 반사계수와의 차이는 Case 3 > Case 2 > Case 4 > Case 1 순으로 측정되었다.

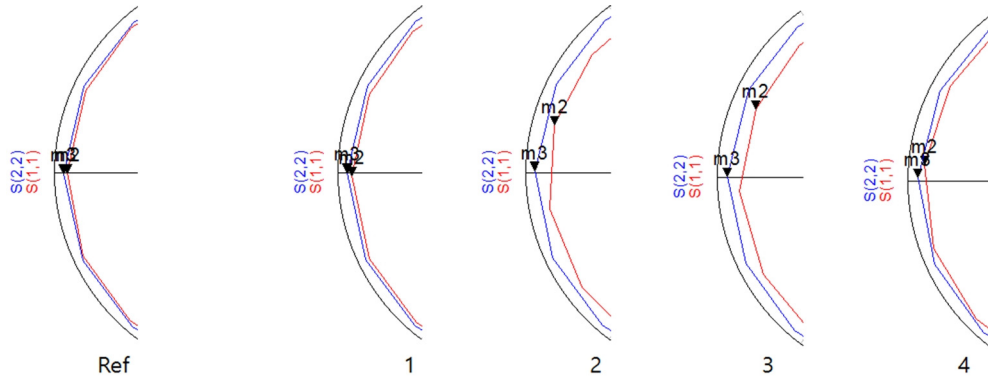


Fig. 10. Variations of S11 and S22 parameters over distance at  $f=6.78$  MHz

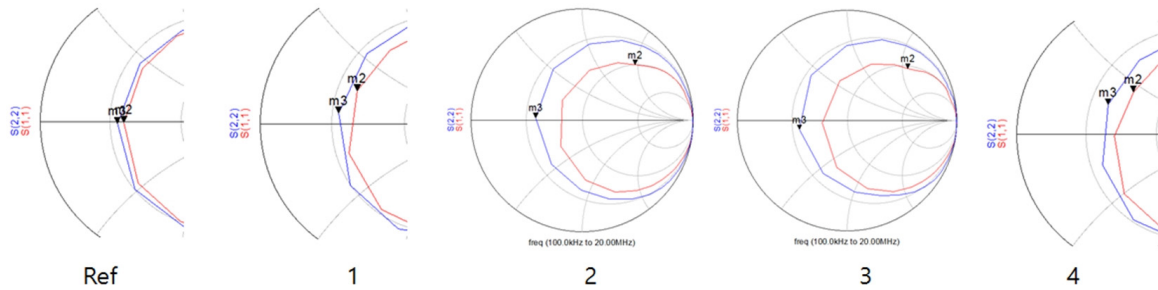


Fig. 11. Variations of S11 and S22 parameters over distance at  $f=12$  MHz

주파수 6.78 MHz와 12 MHz에서 각 Case별 반사계수 S11과 S22의 변화량은 각각 Fig. 10과 Fig. 11과 같이 측정되었다. 이 주파수 대역에서도 가설과 같이 Case 3 > Case 2 > Case 4 > Case 1 순으로 기준 환경과의 차이를 확인할 수 있었다. 따라서 각 Case별 경로손실 S21은 기준 환경에서 측정된 경로손실과 비교했을 때 주파수에 따라서 가설과 다른 결과를 보였지만, 스미스 차트 상에서 반사계수인 S11과 S22는 기준 환경과 비교했을 때 모든 주파수 대역에서 가설과 같은 결과를 확인할 수 있었다.

### 3.3 송·수신 코일 안테나간 거리에 따른 반사계수 변화 결과

Fig. 6과 같이 경로손실 S21은 공기와 흙에서의 차이가 송·수신 코일 안테나간 거리에 따라 오히려 커지는 결과가 나타났다. 이는 경로손실 S21이 매질 변화의 영향보다 코일 안테나간 거리에 따른 손실량이 커기 때문에 발생하는 현상으로 해석할 수 있다. 이는 지반환경 변화 감지를 위한 계측 물리량으로 적합하지 않다는 것을 의미한다. 따라서 경로손실 S21의 대안으로 반사계수 S11과 S22가 계측 물리량으로 강건성 및 유용성을 가지는지 검증할 필요가 있다.

주파수 대역별 송·수신 코일 안테나간 거리에 따른 반사계수 S11과 S22의 변화 특성을 살펴보기 위해 토조를 송·수신 안테나의 중앙에 위치시킨 후 송·수신 코일 안테나간 거리를 32 cm, 40 cm, 50 cm, 60 cm로 변화시키며 측정하였다.

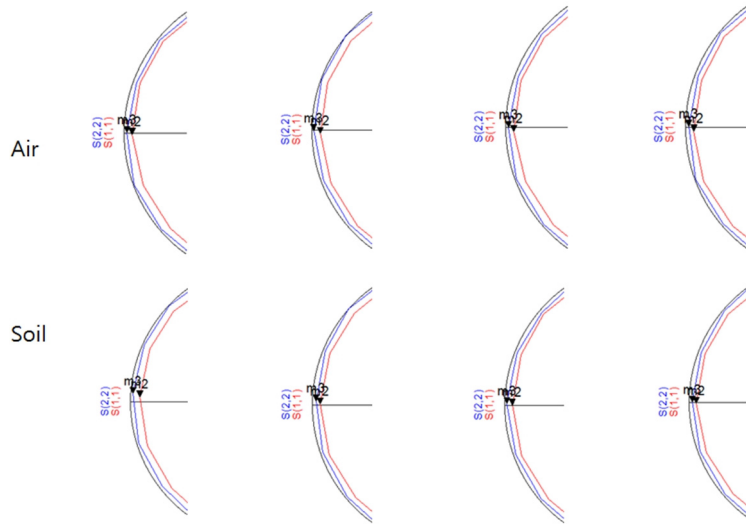


Fig. 12. Variations of S11 and S22 parameters over distance at f=4 MHz

주파수 4 MHz에서의 거리에 따른 반사계수 S11과 S22의 변화는 Fig. 12와 같다. 앞선 경로손실 S21의 측정결과와 비교했을 때, 송·수신 코일 안테나간 거리가 줄어들수록 흡을 통과하는 자기장의 비율이 증가하여 매질의 특성으로 인한 반사계수 S11과 S22의 차이가 커짐을 확인할 수 있다.

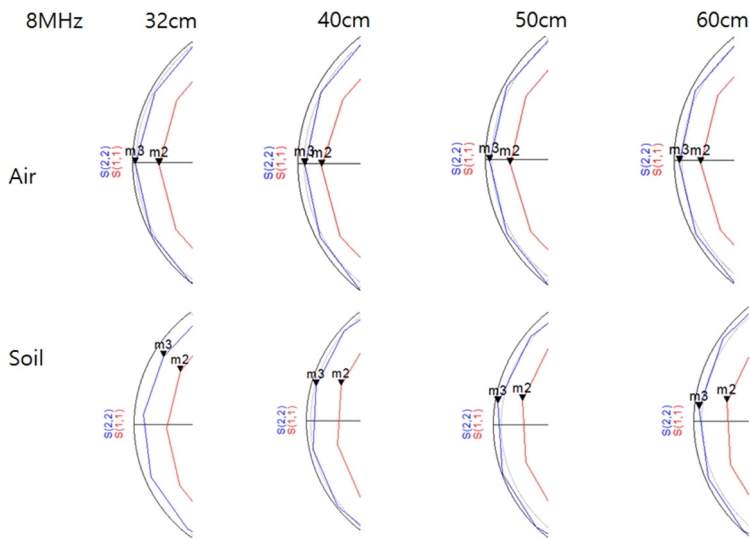


Fig. 13. Variations of S11 and S22 parameters over distance at f=8 MHz

Fig. 13은 주파수 8 MHz에서의 거리에 따른 S11과 S22의 변화를 보여준다. 이 결과에서도 송·수신 코일 안테나간 거리가 줄어들수록 이종매질인 토조의 영향에 따른 반사계수 차이가 커졌다. 또한, 저주파수(4 MHz) 대역일 때보다는 고주파수(8 MHz) 대역에서 토조의 영향에 따른 반사계수 차이가 커지는 경향을 보였다.

매질 변화에 따른 자기공명 신호 전달 특성 실험 결과는 자기공명 기반 모니터링 체계가 지반 내 물리적 환경변화 감지 분야에 적

용될 수 있는 가능성을 확인하였으며, 계측 물리량으로서 경로손실 S21보다는 반사계수인 S11과 S22를 이용하는 것이 보다 적합함을 확인하였다.

연구 결과를 바탕으로 상시·영역 감시를 위한 자기공명 기반 체계의 제원으로 Table 5와 같이 제시할 수 있다.

**Table 5.** Requirements for the magnetic resonance-based ground sink monitoring system

Parameter	Value
Antenna type	for range extension
	for space occupancy
Wire type	
Mechanism for signal transmission	
Resonant frequency	
Performance metric	
Sensitivity for receiving power	

## 4. 결론

본 연구에서는 고주파수 대역에서의 자기공명 신호 전달 특성의 변화로부터 지반 내 물리적 환경 변화를 상시·영역적으로 감시할 수 있는지를 확인하기 위해 실내 실험을 수행하였다. 공기, 물, 토양 등을 포함하는 다양한 매질, 공진 주파수, 정합, 송·수신 안테나 거리 등 다양한 환경변수에 대해 경로손실 S21 및 반사계수 S11과 S22 변화를 실내 실험을 통해 측정하였다.

실험 결과로부터 i) 공진 주파수가 높을수록, ii) 자기장이 통과하는 구간의 변화된 매질의 비율이 높을수록, iii) 변화된 매질이 송신 및 수신 안테나 주변에 발생할수록 반사계수의 차이가 증가함을 확인하였다. 이는 공진 주파수 뿐만 아니라 매질 전도성, 이종매질의 상대위치 등 매질과 관련한 인자들이 자기공명신호 전달 특성에 영향을 미친다는 것을 의미한다. 또한, 경로손실 S21보다는 반사계수 S11과 S22가 지반 내 물리적 환경 변화를 감시하기 위한 계측 대상 물리량으로 적합함을 확인하였다. 또한, 실내 실험 결과를 토대로 상시·영역 감시를 위한 자기공명 기반 체계 제원을 마련할 수 있었다.

## 사사

본 연구는 미래창조과학부 및 국가과학기술연구회의 융합연구사업인 ‘사물인터넷 기반 도시 지하매설물 모니터링 및 관리시스템 기술 개발’(융합연구단-14-2-ETRI)과 한국지질자원연구원의 주요사업인 ‘지질환경재해 예측 및 리스크 평가를 위한 Geo-CPS 기반 플랫폼 기술 탐색 개발’(과제코드 GP2018-002)의 지원을 받아 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Askari, A. R. Stark, J. Curran, D. Rule, K. Lin, Underwater wireless power transfer, *Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*, 2015 IEEE, pp. 1-4.
- Brown, W., 1984, The history of power transmission by radio waves, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. MTT-32, no. 9, pp. 1230-1242.
- Hirai, J., T. W. Kim, and A. Kawamura, 2000, Study on intelligent battery charging using inductive transmission of power and information, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 15, no. 2, pp. 335 – 345.
- Jang, Y. T. and M. M. Jovanovic, 2003, A contactless electrical energy transmission system for portable-telephone battery chargers, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 50, no. 3, pp. 520 – 527.
- Karalis, A., J. Joannopoulos, and M. Soljacic, 2008, Efficient wireless nonradiative mid-range energy transfer, *Ann. Phys.*, vol. 323, no. 1, pp. 34-48.
- Kurs, A., A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, 2007, Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances, *Sci. Express*, vol. 317, no. 5834, pp. 83-86.
- Lee, K. and D.-H. Cho, 2013, Maximizing the capacity of magnetic induction communication for embedded sensor networks in strongly and loosely coupled regions, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, no. 6, pp. 2946-2952.
- McSpadden, J. and J. Mankins, 2002, Space solar power programs and microwave wireless power transmission technology, *IEEE Microw. Mag.*, vol. 3, no. 4, pp. 46-57.
- Sun, Z. and I. F. Akyildiz, 2010, Magnetic induction communications for wireless underground sensor networks, *IEEE Trans. Antenna Propag.*, vol. 58, no. 7, pp. 2426 – 2435.
- Tan, X., Z. Sun, and I. F. Akyildiz, A testbed of magnetic induction-based communication system for underground applications, *IEEE Antennas Propag. Mag.*, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1503.02519>