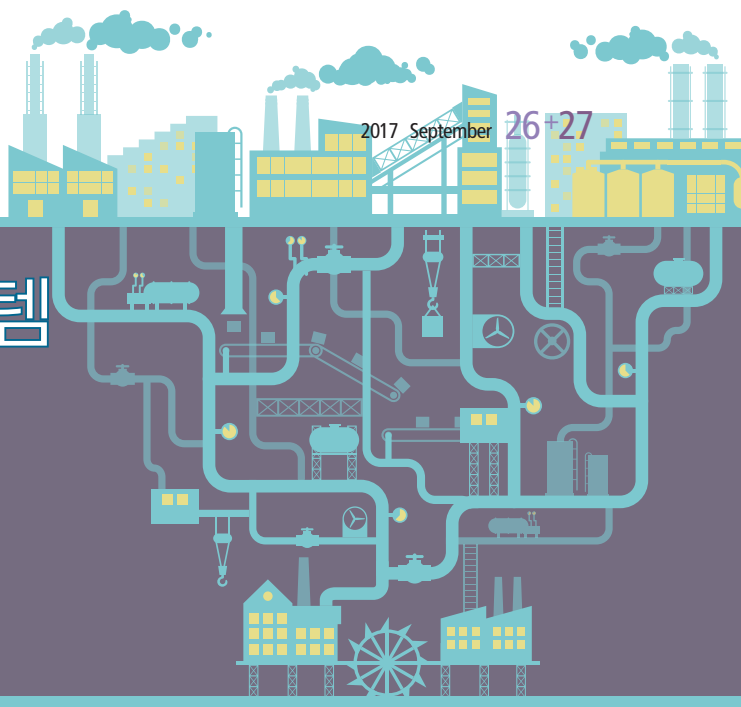


지중 무선 센서 시스템 기술동향



이 기 큰 | 아주대학교 전자공학과

1. 지중 무선 센서 시스템 필요성

지하

에는 도시의 생명선인 다양한 부류의 시설물들이 매설되어 있다. 전력선, 상하수도관, 가스관, 난방선, 송유관, 각종 통신 케이블선 등이 묻혀져 있다. 앞으로도 지중 매설물의 수요는 기하급수적으로 증가 예상된다. 지상의 미관을 위한 지중으로의 매립물, 친환경 버스의 에너지원 매설선, 스마트 보안 감시장치, 싱크홀 문제를 예측하기 위한 토압계 및 수분계, 지진예측을 위한 진동 감지계, 건물이나 교량의 기울어짐 혹은 변형을 감지하는 경

지하에는 도시의 생명선인 다양한 부류의 시설물들이 매설

사계 및 변형률계 등이 포함한다. 지중 매설물 근처의 필요 위치에 다양한 종류의 센서들을 설치하고, 지상으로부터 무선으로 지중 상황을 실시간 감시함으로써 또한 필요시에는 적절한 조치를 취해줌으로써 대형 인명 피해, 재난 사고를 미연에 방지할 수 있게 된다 (그림 1). 이러한 지중 무선 센서 시스템의 운용은 지중 매설물의 상태를 실시간 감지하여 주기점검, 자동 점검 등이 가능케 되며 지반 환경의 변화, 지하수 유입 추이 등이 과학적으로 분석 예측될 수 있다. 지하 매설물에서 발생하는 이상 징후가 실시간 지상 서버에 보고됨으로써 대형사고를 미연에 방지하고 재산 인명피해를 최소화 할 수 있게 된다.

2. 지중 무선통신 기술 현황

다양한 방식의 지중 통신 시스템이 보고되고 있다. 유선망 방식, 전자기파 무선통신방식, 자기장 통신방식, 기계적 진동을 이용한 음파방식 등이 있다.

2.1 유선망 통신

현재 상용화된 기술로서 지중에 통신망을 구현할 수 있는 방법은 유선망이 유일하다. 그러나 유선망 방식의 경우 굴착

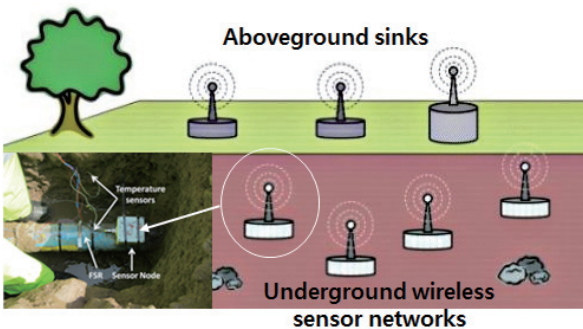


그림 1. 지중 무선 센서 네트워크 단면도. 지중 매설물 주변에 센서들을 설치하고, 지상으로부터 무선으로 지중 상황을 감시한다(1).

표 1. 무선 센서 네트워크에 사용되는 통신 프로토콜별 특성 비교(2)

	ZigBee	RFID	WSN	Bluetooth
동작주파수(Hz)	868M/915M/2.4G	433M/900M/2.4G	868M/915M/2.4G	2.4G
지상통신거리(m)	10-75	1-5	10-75	10
데이터속도(kb/s)	20-250	64-200	250	720
배터리수명(일)	1,000	-	1,000	7

공사시 유선망 파손, 시그널의 지상으로의 전송시 스파크 발생, 유선을 이용해서 지중의 수많은 센서들을 연결해야 함으로써 고비용, 설치의 어려움 발생 등이 문제점으로 지적된다.

2.2 전자기파 무선통신 기술

전자기파 무선통신은 지상에서 가장 널리 사용되는 통신 방식이다. 시스템 구현이 용이하고 시그널 전송시 손실이 매우 적으며 다채널 구현에 적합하고 저전력 고신뢰성을 보유하고 있기 때문이다. 전자기파 무선통신 기술을 지중 무선 센서 시스템으로의 응용을 위한 다양한 노력이 보고되고 있다. 지중에서의 전자기파 무선통신 기술로는 ZigBee, Bluetooth, RFID, UWB 등이 있다. 통신기술별 주요 특성은 표 1에서 요약한다. 이들 중 ZigBee, RFID, ground penetrating radar (GPR) 기술을 이용하여 굴착공사시 발생할 수 있는 매설물 파손사고를 미연에 방지하기 위하여 지하 매설물 유무 감지용으로, 상하수도관 누수감지용, 지하수 유입에 따른 지반 수분량 감지용으로 그리고 지하에서의 전자기파 무선통신 적합성 여부 연구 등을 목적으로 한 적용 사례가 보고되고 있다. 이러한 일련의 노력에도 불구하고 현재 전자기파 무선통신 기술을 지중 무선센서 시스템으로의 적용은 매우 제한적이고 열은 곳에서의 지하 매설물 감지 여부 정도만 응용 가능하다. 2.4GHz 고주파 ZigBee 통신기술은 심한 감쇄 때문에 무선 통신거리가 너무 짧아서 지중 환경에 적합하지 아니하다 결론을 내리고 있다.

지반의 매질은 흙, 돌, 수분, 나무뿌리, 지상으로부터 스며드는 퇴적물 등으로 구성된다. 흙의 종류에도 모래에서 진흙까지 다양하며, 밀도 또한 다르다. 지반에서 수분의 양도 빛물 등에 의해 지상으로부터 지속적으로 유입되거나 지하수 흐름 등에 의해 실시간 변화한다. 시간에 따라 무선통신 매질의 조건이 수시로 변하고 있다. 전자기파의 짧은 통신거리는 지중 구성 물질에 의한 전자기파의 흡수, skin depth 효과, 다중경로 현상, 안테나 문제 등으로 요약된다.

균질의 지중 매질에서 전자기파의 속도는 아래와 같이 표

현된다[3].

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_0\epsilon_r\mu_0\mu_r}}$$

여기서 c 빛의 속도 (3×10^8 m/s), ϵ 매질의 유전율, μ 매질의 투자율, ϵ_0 자유공간에서의 유전율 (8.85×10^{-12} F/m), ϵ_r 상대 유전율 (dielectric constant), μ_0 자유공간에서의 투자율 ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m), μ_r 상대 투자율이다. 유전율 ϵ 는 복소수 형태로써 다음과 같이 표현된다.

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$$

여기서 ϵ' 는 유전 분극 항이며, ϵ'' 는 분극 지연에 의한 에너지 손실 항이다. 유전율에서 허수부와 실수부의 비(ϵ''/ϵ')를 $\tan\delta$ (loss tangent)라 부른다. 실제 지중 환경은 균질의 환경이 아닌 다양한 매질로 구성되어 있으며 결과하는 유전율의 값도 흙의 구성 성분, 흙의 밀도, 수분 함량 등에 따라 크게 다르다. 지반 구성 물질들의 투자율은 자기 물질을 제외하고는 거의 모든 물질에서 ~1의 값을 가진다. 유전율, 투자율, 주파수, 전도도, tangent 손실 등의 파라미터들을 포함하는 지중에서 전자기파의 흡수상수 (absorption constant) α 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\alpha = 2\pi f \left[\frac{\epsilon\mu}{2} (\sqrt{1 + \tan^2\delta} - 1) \right]^{1/2}$$

흡수상수 단위는 1/m이며 이의 역수를 skin depth라 부른다. Skin depth란 전자기파가 지중에서 어떤 매질을 만났을 때 일부는 반사되고 일부는 굴절되어 물질 안으로 들어간다. 이때 입사하는 전기장 진폭의 37%가 감쇄하는 지점까지의 거리를 skin depth라 부른다. 고주파 전자기파의 경우 skin depth가 매우 짧아 대부분의 에너지가 매질 내에서 손실된다. Skin depth는 주파수 이외에도 투자율, 전도도의 제곱근에 반비례한다. 표 2는 지반을 구성하는 요소들의 유전상수 값들을 보인다. 물의 경우 100MHz에서 ~80정도의 값을 지니므로 지반에 수분의 유입은 전자기파 감쇄의 가장 큰 원인이 되고 있다.

표 2. 물질의 상대 유전율 및 상대 투자율[4]

물질	상대 유전율	물질	상대 투자율
Air	1	Soil(dry)	~1
Glass	4-10	Freshwater	~1
Soil(dry)	3-4	Seawater	~1
Freshwater	81	Aluminum	0.99
Seawater	72	Cobalt	600

일반적으로 토양에서 전자기(EM)파의 경로손실(path loss)은

$$\text{Path loss, EM} = -10 \log \frac{P_r}{P_t} = 6.4 + 20 \log(r) + 20 \log \beta + 8.69 \alpha r.$$

여기서 P_r 는 EM파의 송신 전력, P_t 는 EM파의 수신 전력, r 는 미터단위의 전송거리,

$$\beta (= 2\pi f [\frac{\epsilon\mu}{2} (\sqrt{1 + \tan^2 \delta} + 1)]^{1/2})$$

위상 시프트 상수 (radian/m), α 는 감쇄상수이다[5].

지중 무선통신에서 전자기파 감쇄를 최소화하고 통신거리를 증대시키기 위해서는 낮은 주파수대역의 전자기파 사용, 높은 전송 파워, 안테나 이득 이용, 수분의 최소화 등이 요구된다 (그림 2). 지중매질에 의한 전자기파의 감쇄를 최소화하기 위해서는 낮은 대역대의 전자기파 사용이 필요하다. 안테나 사이즈를 감안하여 300~800MHz 통신시스템이 고려되고 있으며 이는 2.4GHz의 30cm 통신거리보다 수십 배 증가된 통신거리를 얻을 수 있다. 높은 송신파워의 전자기파 사용은 통신거리를 또한 증대시킨다. 현재 방송통신법 기준 ~GHz대역에서 ~1.8W가 인체에서 흡수할 수 있는 최대파워로 제정하고 있다. 지중에서의 전자기파 통신은 인체에 접촉할 확률이 적기 때문에 더 큰 파워의 사용으로 통신거리 증대 효과가 있을 것으로 사료된다. 그러나 5dBm에서 10dBm로의 파워의 증대가 +5dBm의 P_r 을 의미하지는 아니한다. 송신파워의 증대가 통신거리 확대에는 분명 기여를 하지만 주파수 조율만큼의 증대효과를 얻지 못한다. 다른 어떤 파라미터를 변화시키는 것보다 통신주파수를 저주파수 대역대로 낮춰 통신하는 것이 가장 큰 효과가 있다. 안테나 이득 증가도 통신거리 확대에 기여한다. 고주파 대역의 통신이 안테나이득 향상 및 안테나 사이즈 소형화에 잇점은 있으나 지상으로부터 보이지 않는 지중의 안테나와의 각도가 크면 전반사 등에 의해 원활한 전파통신이

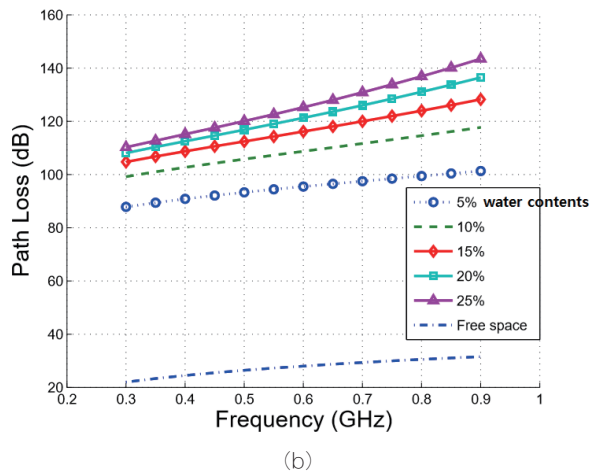
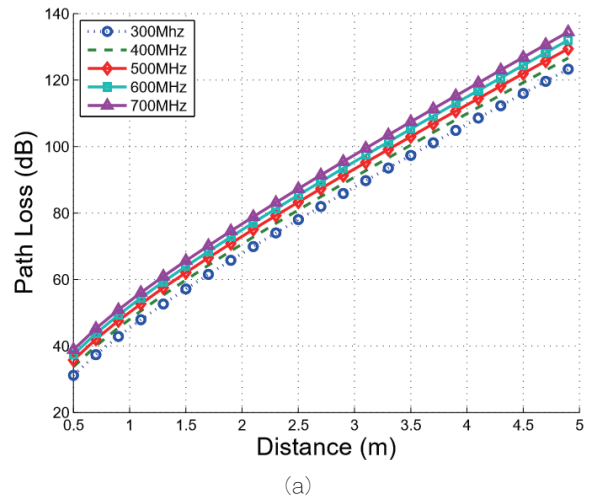


그림 2. 지중에서 전자기(EM)파 경로손실 시뮬레이션 결과. (a) 거리가 증가함에 따라 또한 주파수 대역대가 증가함에 따라 전자기파의 경로손실이 매우 커진다. 현재 2.4GHz의 고주파 ZigBee 통신기술의 경우 심한 감쇄 때문에 30cm 정도의 통신거리를 보이고 있으며 지중 환경에 적합하지 아니하다 결론을 내리고 있다. 안테나 사이즈를 감안하여 300~800MHz 통신시스템이 고려되고 있으며 이는 2.4GHz의 30cm 통신거리보다 수십 배 증가된 통신거리를 얻을 수 있다. (b) 주파수 및 지반 수분함량의 증가로 경로손실이 증가한다. 물의 경우 100MHz에서 ~80정도의 유전율을 지니므로 지반에 수분의 유입은 전자기파 감쇄의 가장 큰 원인이 되고 있다(출처 [5])

어려우며 따라서 저주파 대역대의 안테나를 이용한 지상과 지중간 안테나 beam forming 각도의 정렬이 중요하다.

또 다른 주요한 전자기파 감쇄원인으로서 다중경로페이딩 (multiple path fading)현상이 있다. 입사하는 전자기파는 특성이 다른 매질을 만나면 반사, 굴절, 산란을 경험한다. 공기와 지표면의 경계면에서, 또한 지반을 구성하는 서로 다른 매질들에서 반사, 굴절, 산란이 있으며 이러한 다중경로현상에 의

해 감쇄가 있다. 전자기파의 작은 입사각도 및 센서 주변에 균일한 지중매질을 덮음이 다중경로현상을 최소화한다. 지반 매질의 전도도도 지중통신 거리에 영향이 있다. 지반 온도가 높을수록 전도도가 증가하며 결과로써 전자기파의 감쇄가 증대된다. 지표면으로부터 깊이가 깊을수록 매질의 밀도는 증가하며 전도도 및 전자기파 감쇄가 증대된다. 진흙 환경보다는 모래 형태의 흙의 덮임이 통신거리 확대에 기여한다.

2.3 자기장 무선통신 기술

자기장 무선통신이란 원통형 코일 또는 자기코어 주위에 감겨진 금속 루프 안테나를 이용하여 교류 시그널 방사시 안테나 근접위치에서 자기장의 세기가 전기장의 세기보다 상대적으로 매우 강하며 이 교류 자기장을 이용한 근거리장(near field) 영역에서 통신을 의미한다(그림 3(a)). 일반적으로 근거리장 영역은 안테나로부터 $\lambda/2\pi$ 이내의 거리를 일컫는다. 근거리장 영역 이후부터는 전자기파의 형태로 변형되어 공간으로 퍼져 나가게 되며 안테나의 영향을 받지 않게 된다. ~135kHz 대역대 자기장 통신을 고려한다면 이론적으로 350미터까지의 무선통신 거리로 계산된다.

지상에서 자기장 무선통신은 많이 사용되지 아니한다. 전기장과 비교해서 자기장의 세기가 거리에 따라 급격히 감쇄하므로 원거리 통신에 적합하지 아니하고, 저주파 통신기술이므로 전송속도가 느리고 전송할 수 있는 데이터 용량도 작다는 이유에서이다. 그러나 자기장을 이용한 지중통신은 자기장 확산(magnetic field spreading)에 의해서 거리에 따라 자기장의 세기가 감쇄하는 것 이외에는 지반을 구성하는 매질들에 의한 자기장 흡수가 거의 없으며, 다중경로에 의한 시그널 감쇄도 없고, 자기장 안테나가 코일 형태로 되어 있으므로 저주파 대역대 통신에서도 안테나 사이즈의 지나친 커짐이 없는 장점 때문에 지중통신에 가장 적합한 기술로 여겨지고 있다(그림 3(b)). 표 2은 지반을 구성하는 물질들의 투자율을 보인다. 대부분 매질의 투자율이 공기와 비슷하다. 시간에 따른 지중 구성 매질들은 변화하지만 투자율은 그대로 유지되고 있다. 투자율이 거의 1의 값을 가지므로 skin depth가 매우 길다. 지중 매질을 통과하면서 자기장의 흡수가 거의 없다.

두 개의 루프 안테나를 사용하는 자기장 통신에서 경로손실(path loss)는 다음과 같이 표현한다[6].

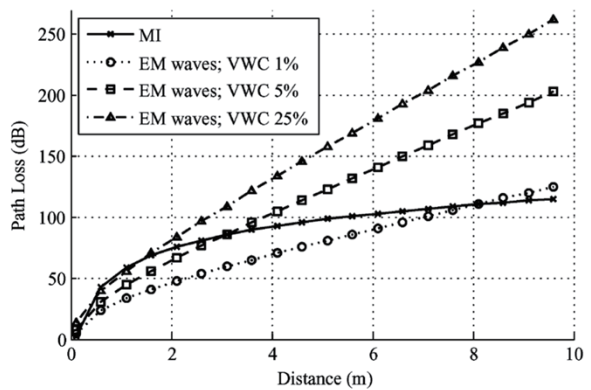
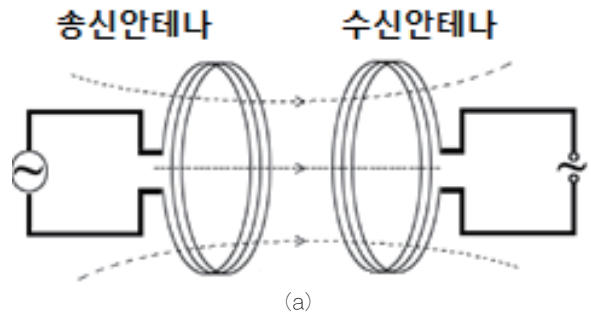


그림 3. (a) 자기장 통신 구성도. (b) EM wave vs. MI 간 거리에 따른 경로손실 비교. 자기장 통신의 경우 지중 수분 함량 변화시 투자율이 그대로 유지되므로 거리에 따른 손실 이외에는 감쇄가 없다(출처 [6]).

$$\text{Path Loss, MI} = -10 \log \frac{P_r}{P_t} \sim 6.02 + 60 \log(r) + 10 \log(N_t / (N_r \cdot a_t^3 \cdot a_r^3))$$

여기서 r 은 송신기로부터 떨어진 거리, N_t 송신 코일의 회전 수, N_r 수신 코일의 회전 수, a_t 송신 코일의 반경, a_r 수신 코일의 반경이다. 다양한 파라미터가 관련하고 있다. 경로손실은 두 안테나 사이의 거리, 안테나 코일 지름, 코일 회전수, 코일 임피던스, 안테나 코어 물질의 투자율, 통신 주파수, 그리고 두 안테나 사이의 각도 등과 관련한다. 회로 효율을 최대화하기 위해선 부하 임피던스가 2차 루프의 출력 임피던스의 값과 동일해야한다.

현재까지 지중에서 자기장 통신의 장점들은 부각되고 있으나 실험적으로 무선 센서 시스템 구축을 위한 충분한 통신거리는 확보되지 못하고 있다. 통신거리 확보를 위해선 저주파수 대역(100kHz~수백kHz) 통신기술이 필요하다. 135kHz 주파수 대역의 통신기술이 표준화 기술로 고려되고 있다. 자기장

통신에서 전송 파워에 관한 인체보호 기준이 있다. 전신노출의 경우 관심대역인 150kHz 미만의 대역에서는 직업인의 경우 12A/m, 일반인의 경우 5A/m이다. 지중에서의 통신이므로 보호기준은 좀 더 자유로울 수 있으므로 인체에 해를 끼치지 않는 범위 내에서 충분한 통신거리가 얻어질 수 있도록 규정의 재정립도 필요하다[7]. 자기장 통신은 안테나 기술과 밀접히 관계한다. 두 안테나 간에 공진주파수 일치, beam forming 기술 적용, 안테나의 이득 증대 등이 통신거리를 개선한다. 안테나 코일 회전수, 코일의 지름, 코어 물질의 투자율 등에 비례하여 안테나 코일에서 발산하는 자기장 통신의 파워는 증대된다.

2.4 음파 무선통신 기술

음파는 탄성복원력이 있는 매질에서 기계적 진동을 이용하는 통신 기술이다. 수직으로 에너지가 전달되는 압축(compressive)파와 전단파(shear wave)로 분류된다. 저주파 통신(100~300Hz)이며 센서로부터 얻어진 데이터를 지진파로 전환하는 과정에서 극심한 에너지 소모가 필요하다. 지진파 진동에너지의 감지센서로는 piezo가 적절하며 piezo는 넓은 주파수 대역대를 커버한다. 지진파는 속도가 느리고 감쇄가 심하며 원거리 통신에는 적합하지 아니다. 지진파는 불확실성이 심하여 지중과 같은 매질이 불균일한 상태에서는 신호의 해석이 어렵다. 데이터 통신능력이 없으며 다채널 환경형성이 어렵다. 배터리 소모가 크다. 현재까지 지중에서 0.6m 통신거리가 보고되고 있다.

3. 지중 무선 센서 시스템 응용 현황

3.1 전자기파를 이용한 지중 무선 센서 시스템 응용 사례

전자기파 무선 통신을 이용하여 지중에서 여러 응용분야가 보고되고 있다. 지하 매질물 유무 및 위치 감지용, 상하수도관 누수감지용, 그리고 지하수 유입에 따른 지반 수분량 감지용 등의 응용사례가 보고되고 있다.

3.1.1 매질물 위치 감지

새로운 건축물 건설이나 보수공사시 지중매질물 손상을 초래한다. 지중매질물의 위치를 정확히 파악하여 모니터링 하는 기술이 필요하다. GPR 방식으로 지중 매질물 위치를 감지하는 무선통신기술이 보고되고 있다. GPR 시스템은 송·수신 안

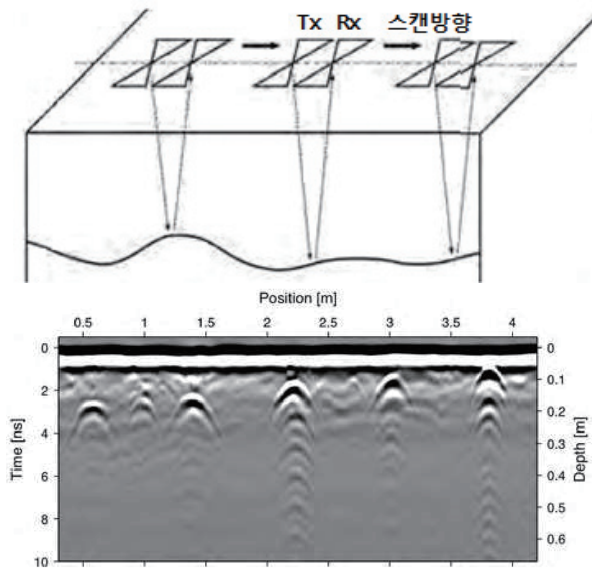


그림 4. GPR을 이용한 지하 매질물 감지 시스템. 위치에 따라 도관으로부터 반사되어 되돌아온 시간차, 진폭을 측정 계산하여 도관의 유무 및 위치를 파악한다. 송신기(Tx) 안테나로부터 일정한 거리에 수신기(Rx) 안테나가 위치한다. 수신기 안테나는 반사된 전자기파를 감지하며 시간차와 진폭을 분석하여 매설된 도관의 유무 및 위치를 계산한다. 시스템은 지표면을 스캔하면서 여러 위치에서 얻어진 데이터를 모아 2차원 이미지화한다. (출처 [3]).

테나, 컨트롤 패널, 그리고 디스플레이 유닛으로 구성된다. 입사된 전자기파는 지하 매질물 경계면에서 반사되어 되돌아온다. 송신기 안테나로부터 일정한 거리에 수신기 안테나가 위치한다. 수신기 안테나는 반사된 전자기파를 감지하며 기준값들과 비교하면서 시간차와 진폭을 분석하여 매설된 도관의 유무 및 위치를 계산한다. 시스템은 지표면을 스캔하면서 여러 위치에서 얻어진 데이터를 모아 2차원 이미지화한다(그림 4). 다중평행선(multiple parallel line)을 셋팅함으로써 3차원 맵핑 구현도 가능하다.

지중에서 수분의 양은 위치별 혹은 계절적 변화에 따라 크게 다르므로 시간차 해석의 어려움이 있으며, 지반 구성 매질로부터의 흡수에 의한 시그널 감쇄, 짧은 통신거리(~30cm @ 2.4GHz), 다중경로, 주변 환경요소의 방해현상 등이 문제점으로 대두된다. 또한 물린 도관의 재질에 따라 반사에너지가 큰 차이가 있으며 금속도관의 경우 전자기파의 흡수가 높아 통신에 큰 영향을 미친다. GPR 방식은 염분이 있는 지반이나 높은 수분 함량 환경에서는 큰 감쇄에 의해 비효율적 통신방식이다. 현재 특정 영역에서만 GPR 방식이 사용되고 있으며 개선을 위한 지속적 노력이 필요하다.

3.1.2 상하수도관 누수 감지

지중에 매설된 상수도관의 누수 유무 및 양의 정도를 파악하기 위해 전자기파 센서 시스템이 응용되고 있다. 상수도관 표면에 음파센서를 부착하고 누수에 의해서 생성된 진동을 감지한 뒤 지상의 리더기에 센싱 정보를 전송함으로써 도관으로부터의 누수의 양 및 위치를 실시간으로 파악한다. 전체 시스템은 음파센서, 송·수신 시스템, 배터리, 지상의 리더시스템으로 구성된다. 파이프라인에서 누수는 진동을 생성시킨다.

생성된 진동에너지는 파이프라인을 따라 음파센서에 에너지를 전달한다. 마이크로폰 혹은 압전 음파센서를 이용하여 누수의 정도를 알 수 있으며 압전 음파센서가 넓은 영역의 주파수 범위를 커버할 수 있으므로 보다 적절한 센서이다. 파이프라인을 따라 설치된 두 센서의 센싱 결과(진폭 및 도착시간 지연)를 비교함으로써 누수 위치를 유출한다(그림 5). 음파센서에서 얻어진 데이터는 무선 송수신 시스템을 이용하여 지상의 리더기로 송신된다. 지상의 리더기에서는 최소 두 위치에서의 데이터를 비교 분석하여 누수의 양 정도 및 위치를 실시간, 온라인으로 파악할 수 있다.

파이프라인을 따라 전파하는 진동에너지는 주변 지중 환경에 따라 감쇄의 정도가 다르며, 전파된 거리에 따라 선형성을 가지지 아니하며, 간섭원(주위로부터의 진동에너지, 전기 모터 등) 노이즈에 영향을 받는다. 파이프라인의 두께, 재질, 지름에 따라라도 진동에너지는 주파수, 속도, 세기의 차이가 있다. 지중에 묻혀진 센서시스템은 배터리에 의해 구동된다. 배터리 수명연장을 위해 시스템은 저전력시스템으로 구현되어야 하며, 이를위해 낮은주파수 대역대 통신을 사용하면 데이터

지중에 묻혀진 센서시스템은 배터리에 의해 구동

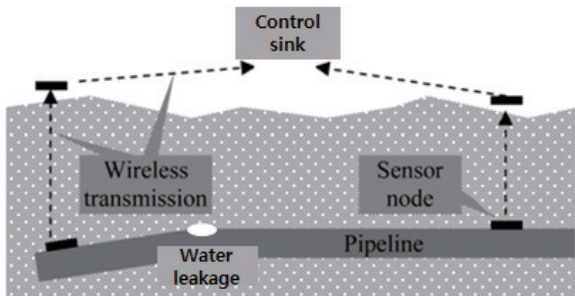


그림 5. 파이프라인을 따라 설치된 두 센서의 센싱 결과(진폭 및 도착시간 지연)를 비교함으로써 누수 유무 및 위치를 유출한다(8).

전송속도는 늦더라도 고주파 통신에 비해 저전력 구동이 가능하며 또한 휴면모드(sleep mode)의 주기도 길게 설정한다. 송신시 큰 송신 전력을 사용하지 말고 최소한의 발신 전력을 사용하도록 한다. 에너지 하비스팅 기술(자기유도, 진동에너지, 열에너지)과 접목하여 배터리 충전식이 가능하도록 함으로써 배터리 수명을 연장시킬 수 있다.

센서 시스템은 오랜기간 지중에 매설되어 있으므로 정교한 밀봉 기술이 필요하다. 지중에서의 통신이지만 지중에서지중으로, 지중에서지상으로, 또는 지상에서 지중으로의 통신이냐에 따라 특성이 조금씩은 다르다.

3.1.3 지하수 유입에 따른 지반 수분량 감지

지중에서 지하수 유출입에 의해 지반약화, 싱크홀, 지반의 한쪽으로는 쏠림 등이 발생하고 있다. 전자기파 통신을 이용하여 지반의 수분 변화를 감지함으로써 지반의 수분 함량을 실

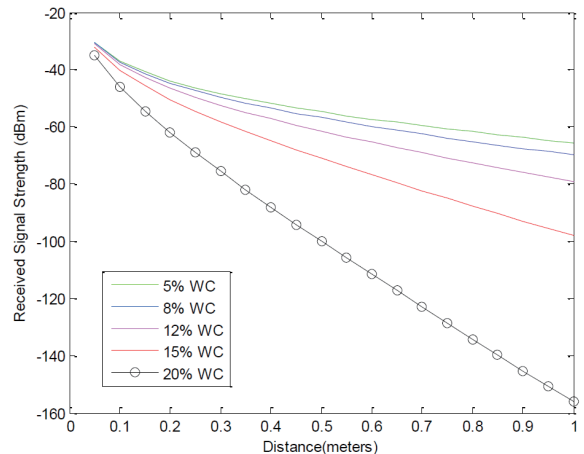


그림 6. RSS를 이용한 지반 수분함량 감지 기술. 수신 신호의 크기에서는 다양한 파라미터가 관련되어 있으므로 N개의 위치에서 센서의 데이터를 종합하여 이론적 데이터와 비교하면서 특정위치에서 수분 함량을 결정한다(출처 [9]).

표 3. 토양특성에 따른 수신신호 크기에 미치는 영향

토양특성	수신 신호에 미치는 영향
입자 크기	입자크기 ↑ → 수신신호 ↑
수분 함량	수분함량 ↑ → 수신신호 ↓
염분 함량	염분함량 ↑ → 수신신호 ↓
토양 밀도	토양밀도 ↑ → 수신신호 ↓
온도	온도 ↑ → 수신신호 ↓

시간 감지하는 응용이 보고되고 있다. 송수신 시스템은 지상과 지하에 위치해 있으며 지중에 위치한 송신시스템에서 전자기파를 방사하고 지상에 있는 수신시스템에서 수신된 신호 강도 (received signal strength (RSS))를 분석하는 방식이다. 지반 내 수분의 변화는 유전율의 증가로 나타나며 통신환경을 크게 악화시키므로 수신기에서 수신 신호 강도는 큰 감쇄로 나타난다. 감쇄의 정도를 분석하여 지반내 수분 함량을 유출하는 방식이다 (그림 6).

그러나 수신기의 RSS 값은 지반의 투자율, 유전율, 전도도 등 다양한 파라미터와 관련한다. 또한 지중환경도 수시로 변화한다. 이들 여러성분중에서 한 성분인 수분의 양만 유출하는것은 쉬운일이 아니다. N개의 위치에서 센서의 측정 및 데이터를 종합하여 이론적 데이터와 비교하면서 특정위치에서 수분 함량 변화량을 결정한다. 여기에서도 통신거리 증대가 가장 큰 이슈이며, 저주파수 대역대 통신, 높은 송신전력 방출, 높은 안테나 이득 및 정렬 등을 통해 통신거리 확대에 노력중이다.

3.2 자기장 통신을 이용한 지중 무선 센서 시스템 응용 사례

자기장 통신을 이용한 지중에서 여러 응용사례가 보고되고 있다

3.2.1 RFID


근거리 자기장 통신의 대표적인 응용은 RFID 통신기술이 있다. 지중에 매설된 매설물 위치를 찾는 데 응용되고 있다. 시스템은 태그와 리더기로 구성된다. 태그의 동작을 위하여 필요한 모든 에너지는 리더기가 제공한다. 리더기로부터 에너지를 받아 태그에 전류가 흐르고 다시 리더기로 정보를 제공하는 방식이다. 다양한 주파수 대역대가 있다. 125kHz, 13.56MHz, 900MHz, 2.45GHz 등 응용영역에 따라 대역대가 나누어 진다. 수십 cm에서부터 약 1.5 meter까지 통신이 가능하다. 지중에 매설된 태그에 전류를 유도시키고 정보를 제공받아서 태그의 매설 위치를 찾는다. 물이나 금속 등이 있는 환경에서도 통신이 원활하다. 표면으로부터 깊게 묻혀있는 매설물의 경우 필요한 정확도까지는 제공하지 못하고 있다.

3.2.2 Magnetic field network (MFN)

자기장 무선통신을 위해 구현된 시스템으로써 자기장 통신 코디네이터 및 지중에 매설된 자기장 통신노드로 나뉘 수 있다. 지중에서 노드들 사이에 통신도 가능하다. 시스템은 안테나, 송수신회로, 컨트롤 유닛, 센서 모듈, 배터리 등으로 구성된다. 저주파 대역인 30kHz ~ 300kHz 통신기술을 사용한다. 현재까지 지중환경에서 자기장 통신의 적합성에 관한 연구는 보고되고 있으나 센서 데이터를 무선으로 전송하는 실험적 결과는 보고된바 없다. 자기장 통신에서 데이터 통신전달에 대한 연구가 필요하다. 전자기파 기반 기술에 비하여 자기장 통신기술은 지중에서의 적용을 위한 초기단계이며 아직까지는 활성화되지 못했다. 그러나 전자기파와는 달리 지중에서 감쇄현상이 일어나지 아니함으로 체계적 통신기술 연구가 지속적으로 이루어진다면 다양한 무선 센서 네트워크 구성이 이루어질 것으로 사료된다.

지중에서 노드들 사이에
통신도 가능

4. 맺음말

지중에 센서노드를 위치시키고 지상과 무선 데이터 통신을 통해 지반의 상황을 실시간 모니터링할 수 있는 통신기술들을 살펴보았다. 현재는 전자기파 기반의 센서 시스템이 주를 이루고 있으나 지반 구성물질에 의한 흡수, 다중경로, 짧은 통신거리, 매질의 불균일에 의한 신호해석의 어려움 등이 문제이다. 자기장 통신기술이 새로운 대안으로 보고되고 있으나 아직까지는 충분한 통신거리를 확보하지 못했고 저주파통신, 파워증대, 안테나 공진주파수 일치 및 beam forming 기술 등을 통해 통신거리 확대가 필요하다. 센서에서 얻어진 결과를 통신시스템에 실어 효과적으로 전송하는 데이터 처리 기술도 필요하다. 

참고문헌

- [1] I. Akyildiz, E. Stuntebeck, "Wireless underground sensor networks", Ad Hoc Networks, 2006.4, p.669
- [2] 김선희, 원윤재, 임승욱, "난환경에서의 무선 센서 네트워크를 위한 자기장 통신 기술", 정보처리학회지, 2009.5, p.57

- [3] K. Takahashi, J. Igel, H. Preetz, S. Kuroda, "Basics and application of ground penetrating radar as a tool for monitoring irrigation process", Problems, Perspectives and Challenges of Agricultural Water Management, Intech. Co., 2012.3, Book Ch.8
- [4] 김선희, 이승준, 황규성, "자기장 통신을 이용한 무선 지중 센서 시스템 설계", 전자공학회 논문지, 2012.12, p.97
- [5] L. Li, M. Vuran, I. Akyildiz, "Characteristics of underground channel for wireless underground sensor networks", Ad Hoc Networking workshop, Greece, 2007.6, p.92
- [6] Z. Sun, I. Akyildiz, "Magnetic induction communications for wireless underground sensor networks", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010.7, p.2426
- [7] 임승욱, 강신재, "자기장통신기술 소개 및 표준화 동향", TTA journal, 2010.1, p.83
- [8] B. Hieu, Y. Kim, Y. Park, T. Jeong, "Wireless transmission of acoustic emission signals for real-time monitoring of leakage in underground pipes", Journal of Civil Engineering, 2012.5, p.805
- [9] S. Yoon, E. Ghazanfari, L. Cheng, S. Pamukcu, M. Suleiman, "Subsurface event detection and classification using wireless signal networks", Sensors, 2012.12, p.14862