저주파 Electric Field Sensing Antenna를 이용한 새로운 탐사 및 계측에 관한 연구

배 명 수, 여 영 호, 손 수 국
수원대학교 정보통신공학과
전화 : 031-220-2532 / 핸드폰 : 019-274-3491

A Study on New Geoelectric Survey and Instrumentation Using Low Frequency Electric Field Sensing Antenna

MyungSoo Bai, YoungHo Yeo, SuGoog Shon
Dept. of Information & Telecommunication Engineering, The University of Suwon.
E-mail : bms74@netian.com

Abstract

This paper has been studied a new geoelectric survey and instrumentation using Low Frequency Electric Field Sensing Antenna. "Low Frequency Electric Field Sensing" is a technology in new method of survey to use array type antenna, the power of operation in antenna is using AC or DC pulse instead of DC current. The architecture of system embodied transceiver system using a microprocessor(PIC) of Microchip Technology Inc. An array antenna design and it control transmission of antenna to use CDMA in this system. It is using array type antenna for the earth's crust to survey explain from theory and experience.

I. 서론

본 논문에서는 새로운 탐사 및 계측 방법으로서 Electric Field Sensing을 활용하는 방법을 제안한다. 이 탐사방법은 저주파 Electric Field를 송·수신하며, 수신된 Electric Field로부터 중간 매개 물질의 특성을 추출하여 탐사하는 기술이다. 탐사기술로서 이론적으로는 저주파 Electric Field의 송·수신, 신호처리 및 분석, 시스템 구성 기술로 분류된다.

기존 탐사방법인 4-Probe방식은 2개의 Probe를 통하여 직류전류를 인가하고, 또 다른 2개의 Probe로는 탐사표면에서 Electric Field 분포를 측정한다. 측정 전위차 분포가 지하구성 물질의 전기적 특성, 즉, 전기비저항과 유전율의 차이에 따라 다르게 나타나는데, 이렇게 지표면 전위차 왜곡 현상을 측정하여 지하구조에 대한 탐사가 가능하게 된다. 실제 이 방법은 석유, 광물, 지하수, 지열 등의 유용 지하자원 탐사, 환경 오염대의 분포 범위 규명 및 토목건설을 위한 지반조사 등에 널리 이용되고 있다.

본 논문에서 제안하는 저주파 Electric Field 안테나를 사용한 탐사방법은 기존의 4-probe 방식과는 전혀 다르다. 무엇보다도 전극대신에 Array 형식의 안테나를 사용하고, 안테나 구동 전원도 직류전원 대신, 교류 또는 직류 pulse를 사용한다. 신호 분석방법, 원리 및 시스템 구성 방법도 매우 다르다. 이론적으로 설명을 하고 또한 각종 실험 방법을 통하여 이론을 검증한다. 지층의 특성을 파악하는 분야와 지층의 매설물 탐사분야에 본 탐사방법을 적용하여 그 가능성 및 정밀도를 토론한다.

II. 저주파 Electric Field Sensing 탐사 원리

먼저 탐사에 대하여 이론적으로 설명한다. 본 탐사

방법에서는 송수신 안테나 사이에 100 kHz 이하의 저주파 신호를 사용한다. 이 경우 신호의 파장은 수 km 단위가 되는데 반하여, 송수신 안테나 간격이 수 cm에서 수 m 임으로 전자기학적으로 준정적(quasi-static) 상태로 가정할 수 있다. 실험적으로 송수신 안테나를 평판전극 형태로 만들고 지표면에 일정 간격으로 배치한 후 100 kHz 신호를 인가한 후 R, L, C 에 의한 임피던스를 LCZ 계측기로 측정하였을 때 C(커패시턴스)에 의한 임피던스가 지배적인 항목이었다.(그림1 참고) 즉, 다른 요인에 의한 임피던스는 무시될 수 있었다. 송·수신 안테나사이에 커패시턴스에 의한 임피던스 전압강하는 전계(Electric Field)의한 전압강하로 해석될 수 있다. 그러면 송·수신안테나는 커패시턴스를 형성한다고 설명할 수 있으며, 신호에너지는 송신 안테나에서 수신안테나로 전계를 통하여 전달된다.

이것을 이론적으로 설명하면, 송수신 안테나사이의 전계는 Maxwell 방정식 중 Faraday 법칙(1)

$$\nabla \times H_1 = J_1 + \varepsilon \frac{\partial E_0}{\partial t} \qquad (1)$$

에 의하여 결정되게 된다. 그러나 양 안테나사이에 전도전류(conduction current)가 없다고 가정 할 경우 (2)와 같이 간략화 될 수 있다.

$$\nabla \cdot J_1 = -\frac{\partial \rho_0}{\partial t} \qquad (2)$$

이 경우 안테나사이의 특성은 Capacitive 또는 Inductive의 경우로 해석이 될 수 있다. 직류상태에서는 Electric Field와 Magnetic Field 사이에 커플링(coupling)이 없기 때문에 두 가지를 분리해서 다룰 수 있다.

실제 안테나는 공기를 통하여 절연되어 있어서 도전전류가 흐르지 않는다고 가정할 수 있다. 식(2)에서 변위 전류의 다이버전스는 전하의 축적으로 나타나는데, 자유전하는 10^{-6}초 이내에 소멸된다.(흙과 같은 물질에서의 relaxation rime constant가 microsec 수준) 따라서, 여기서 사용하는 100kHz 이하의 주파수에서는 변위전류의 변화율을 무시할 수 있게 된다.

이것을 회로해석 모델로 유도할 수 있다. 송수신 안테나가 공간상에 고정된 간격으로 위치해 있고 안테나 주위로 폐 공간을 적분하면 (3)과 같은 회로방정식으로 간략하게 유도된다.

$$I = C\frac{dV}{dt} \qquad (3)$$

이와 같은 간략화를 준정적 근사라고 하며, 전자기파의 파동 방정식을 회로 방정식으로 단순화하는 것이다. 커패시턴스 형태의 송수신 안테나사이에서의 송신신호와 수신된 신호 사이에는 다음과 같은 관련성이 있다. Electric Field는 스칼라(scalar)전위에 의해 재구성되고 이것에 의한 수신안테나의 전류는 송신전위의 시간 도함수에 커플링 되어 있다. Electric Field Sensing은 회로이론의 Capacitive로 간주 할 수 있음을 확인 할 수 있다.

송신안테나에서의 신호는 전압형태로 인가되고, 수신안테나에서의 신호는 전하의 축적에 따른 전류의 변화로 해석되는데, 식(3)에서 시간의 적분을 통하여 식(4)와 같이 유도된다.

$$\int I(t)dt = CV(t) \qquad (4)$$

여기서 I(t) 수신전류, V(t) 송신전압이며 모두 시간의 함수로 주어진다. 송신안테나에서의 특정시간에서의 송신전압과 수신안테나에서의 신호에 대한 시간적분을 구하는 신호처리를 수행하면 우리는 송수신 두 안테나 사이의 커패시턴스(C)를 계산해낼 수 있다. 이 기술을 사용하면 반도체 웨이퍼의 전기적 특성을 파악하는데 현재의 4-probe 방식의 대체기술로 활용될 수도 있다. 이 신호처리 기법을 활용하여 다음의 장에서 실험적 분석을 한다.

III. 시스템 모델링 및 설계

3.1 안테나의 구조

그림 1과 같이 똑같은 크기의 함석판을 나무판 위에 배치하고 반대편 쪽은 은박지와 같은 도전성 물질을 입혀서 한쪽 면의 capacitance 값을 균등화시켜서 송·수신안테나를 구성한다. 그림에서는 중앙부분에 1 개의 수신안테나, 코너 부분에는 4 개의 송신안테나가 배치되어 있다.

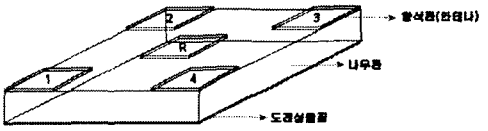

그림 3 안테나의 구조

3.2 안테나 모델링

위의 그림1에서 주어진 안테나는 Electric Field Sensing 의 원리를 적용하여 안테나상호간, 예를 들어 송·수신안테나간에 전기적으로 커패시턴스가 등가 적으로 존재한다고 모델링을 할 수 있다. 이것을 그림2에 등가 적으로 나타내었다.

송수신 안테나간의 커패시턴스 값을 찾고자 LCZ 측

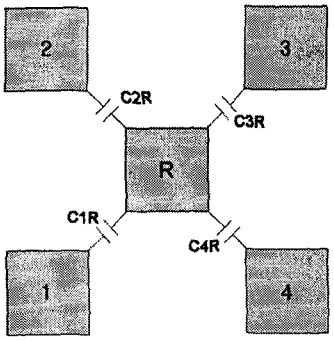

그림 4 안테나사이의 C값 모델링

정기로 Capacitance의 값을 측정하였다.

LCZ 측정기로 각 안테나 사이의 C 값을 100kHz에서 측정한다. 여러 상황에 따라 틀려지므로 여러 번 측정하여 평균값을 이용한다. 참고로 C1R은 송신안테나 1번과 수신안테나(R) 사이의 커패시턴스 값을 의미한다. 실험실에서 안테나가 만들어지고 수작업에 의하여 안테나가 배치된 이유로 안테나사이에 정전용량이 완전 대칭이 아니다. 표1에 4 개의 다른 송신안테나와 수신안테나 사이의 정전용량이 측정되어 나타나 있다.

C1R	C2R	C3R	C4R
7.77	7.23	7.1	7.67

표 5 각 안테나사이의 측정된C값의 평균값(pF)

3.3 신호분석 및 Calibration

신호처리 기법의 정밀성 및 적합성을 검증하기 위하여 그림2에서 주어진 안테나 구조에 대하여 송수신 안테나사이의 정전용량(C1R)을 측정하고자 한다. 그림3과 같이 한 개의 송수신 안테나 사이에 Function Generator로 100kHz 5V Sine wave를 인가하고 수신안테나에서의 전류를 측정하고자 했다. 오실로스코프의 전류probe를 구할 수 없어 그림3에서와 같이 부하저항(RL)을 직렬로 연결하고 부하저항에서의 전압강하를 통하여 전류 파형을 측정하였다. 부하저항의 영향을 최소화하도록 선택하였는데 실험적으로 C의 임피던스는 약 200kΩ이고 부하저항은 10kΩ 이었다.

식(4)에서 제시된 송수신 신호처리 기법을 적용하여 두 경우에 대하여 실험을 하였다. 첫 번째는 송신전원을 정현파(sinc)로, 두 번째는 펄스로 주고 실험을 하였다.

신호 파형의 면적을 구하는데 구간별로 설명한다.

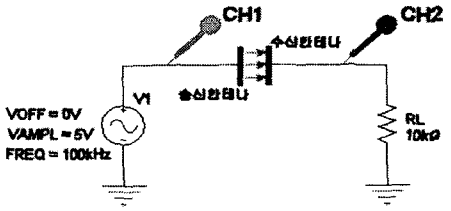

그림 3 Sin Wave를 이용한 안테나의 등가회로

우변의 V는 수신측에 전하량을 축적시키기 위한 송신전압인데 최대 값으로 상승하였을 때를 기준으로 사용한다. 송신전압이 0에서 최대값까지 올라갈 때만큼의 시간동안 수신에서의 파형을 적분한다. 실험에서 최대값은 5.3V이다. 좌변에서 전류 I는 Ch2 전압 파형에 10kΩ으로 나눈 값으로 표현되며, 수신전류의 반주기를 표시하면 그림 4와 같다.

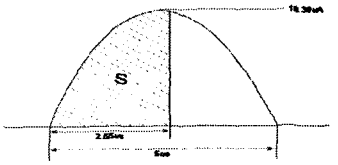

그림 6 수신전류의 반주기

송신이 최대값까지 올라갈 때의 시간이 2.55μs이므로 그림 4에서 2.55μs 동안의 시간동안만 면적적분을 통하여 값을 구한다. MATLAB을 이용하여 구한 Q의 면적은, 전하량과 같으므로 $Q=2.508860447\times10^{-11}$[C]이 된다. $Q=CV$ 관계식에서 C값을 구하면

$$C=\frac{2.508860447\times10^{-11}}{5.3}=4.7337\times10^{-12}\fallingdotseq4.73pF$$

과 같이 주어진다. 다음 두 번째로 Pulse를 이용하여 C값을 측정한다. 그림 5는 송신과 수신전압 파형이며

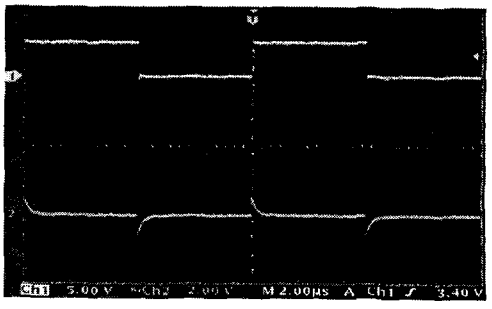

그림 7 송신전압과 수신전압 파형

수신전류의 면적은 $Q=2.2986\times10^{-11}$[C]과 같으며 정전용량이 4.6 pF 로 계산되었다. 두 실험 경우 단위는 일치하나 신호의 적분시 노이즈 영향을 받아 어느 정도 불일치성이 있다. 무엇보다도 LCZ로 측정하였을 때와 비교하여 40% 정도의 오차를 보이고 있는데 아마 직렬로 연결된 저항의 영향을 받은 듯하다.

Ⅳ. 시스템 개발과 실험

4.1 시스템 개발

이러한 기본 원리를 적용하여 탐사 측정시스템을 그림6과 같이 구성하였다. 송신안테나와 수신안테나는 멀티어레이 형식으로 배치되어 있다. Host Computer로부터 실행명령이 내려지면 Microcontroller에서는 100kHz Carrier Signal 펄스를 CDMA 방식으로 송신안테나에 보낸다. 이 Carrier Signal은 각 송신안테나에 인가된 후 수신안테나 사이에 Electric Field를 형성하게된다. 수신안테나에서는 이 신호들을 받아 Field의 변화량을 전하량의 축적에 따른 전류변화로서 Signal Amplifier를 통해 다시 Microcontroller에서 신호처리 후 Electric Field 정보가 Host Computer로 들어 가게 된다. 여기서 송·수신안테나의 Field에 대한 관계를 송신전압과 수신된 전하량의 값을 가지고 송·수신안테나 사이에서의 Capacitance값의 변화를 추출할 수 있다.

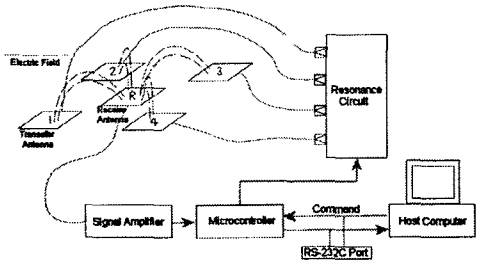

그림 8 Block Diagram of System

4.2 System Calibration

송수신 안테나사이에 3.5 pF 콘덴서를 직렬로 연결하고 식(4)에 따른 신호처리를 하였다. 실험결과 송수신 파형을 그림7에 나타내었다. MATLAB을 사용하여 수신측 입력임피던스(Z)의 추출이 가능하다. 수신전압 적분 값은 1.1273×10^{-4}이 되는데,

$$\frac{1.1273\times10^{-4}}{2\times Z} = C\times33.6 \quad (\text{여기서 } C=3.5\text{pF})$$

관계식에서 Z 가 480kΩ로 계산된다.

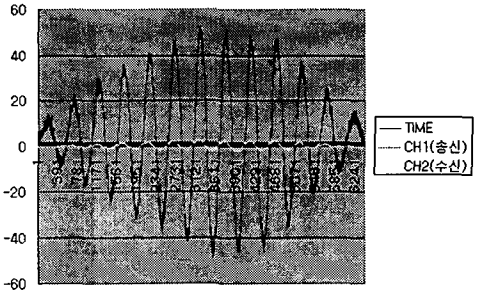

그림 7 Calibration시 송수신 파형

Ⅴ. 결론

마지막으로 송수신안테나(C1R)에 대하여 평가를 하였다. 시스템 입력임피던스 480kΩ를 사용하여 C1R을 평가한 결과가 6.4 pF으로 되었다. 그림 8에 실험결과가 나타나 있는데 노이즈가 존재한다.

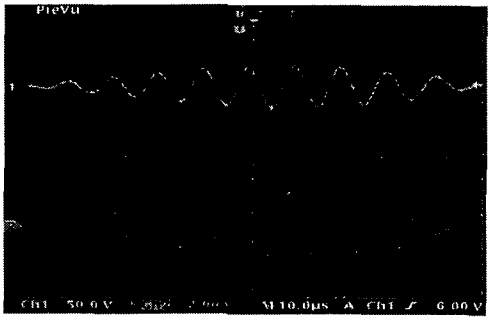

그림 8 실제 탐사시스템 송수신전압 파형

본 연구를 통하여 아직은 실험방법 및 신호처리 방식이 미비하나 새로운 탐사방법으로 지속적으로 연구하고, 응용할 분야를 개척하게 되었다.

참고문헌(또는 Reference)

[1] Joshua Reynolds Smith, *"Electric Field Imaging"* Massachusetts Institute of Technology, February 1999.

[2] William H. Hayt, JR. *"Engineering Electromagnetics"*, 5th ed., McGraw-Hill, 1989.