

論文2001-38TC-2-4

# 지하탐사 레이더의 응답 계산에 적합한 안테나 급전모델의 비교 연구

(A Comparison Study of Antenna Feed Models Suitable for Computation of Responses for a Ground-Penetrating Radar)

玄昇燁\*, 金世潤\*\*

(Seung-Yeup Hyun and Se-Yun Kim)

## 요약

FDTD법을 이용하여 GPR의 응답을 계산하기 위해서는 정확하고 효율적인 안테나 급전 모델이 매우 중요하다. 기존 문헌에 의하면 각주파수 영역에서 등가 회로망 모델, 시간영역에서 1차원 전송선 셀 모델, 전압 경계조건 모델 등이 있다. 본 논문에서는 이러한 급전모델간의 이론적인 관계를 검토하였다. 매우 짧은 길이의 무손실 급전선이 송신기(또는 수신기)와 정합 되었을 때 위의 3가지 모델이 서로 등가관계가 성립함을 알 수 있었다. 모의계산의 정확성과 계산의 효율성 관점에서 급전모델에 따른 실제 GPR 시스템의 수신응답 계산 결과들을 비교하였다.

## Abstract

An accurate and efficient antenna feed model is very important for computing GPR responses using the FDTD method. In literature, there are several feed models such as the equivalent network in angular-frequency domain, 1-D transmission-line cell, voltage boundary condition in time domain, etc. In this paper, theoretical relationship among the models is investigated. It is found that the above three models become equivalent when a short and lossless feed line can match with its connected transmitter(or receiver). In view of accuracy and efficiency of the simulation, the FDTD results according to the feed models are compared with the measured data of the receiving responses for an actual GPR system.

## I. 서론

지하탐사 레이더(GPR; ground-penetrating radar)는 지표면상에서 땅을 직접 파헤치지 않고서도 지반 구조의 탐사나 여러 가지 표적을 탐지할 수 있으므로 응용범위가 점차 확대되고 있다<sup>[1]</sup>. 최근 계산기능이 발전함에 따라 이러한 GPR에 대한 해석기법으로 유한차

분 시간영역(FDTD; finite-difference time-domain) 법<sup>[2][3]</sup>이 매우 유용하게 쓰이고 있다. 응용목적에 적합한 GPR을 최적으로 설계하기 위해서는 실제 시스템의 수신응답을 효율적으로 정확하게 계산할 수 있어야 한다. 특히 GPR 시스템에서 안테나의 급전갭(feed-gap)은 선로상의 전기 신호(전압, 전류)를 전자파 신호(전계, 자계)로 변환하거나 반대로 전자파 신호를 전기 신호로 변환하는 경계 부분이므로 모델링이 매우 중요하다. 3차원 FDTD 공간상에 직접 급전부를 모델링하면 정확한 해석이 가능하나, 일반적으로 급전부의 실제 물리적인 크기가 매우 작기 때문에 FDTD의 정확성 조건(accuracy condition)인 파장에 대한 10분의 1보다 매우 작은 셀로 모델링해야 하므로 계산용량이 급격히 증가하는 단점이 있다. 따라서 정확성은 3차원 공간상에 직접 모델링한 것과 유사하면서 계산용량을 줄일

\* 學生會員. 高麗大學校 電波工學科

(Dept. of Radio Sciences and 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, Korea Institute of Science and Technology)

接受日字: 2000年7月26日, 수정완료일: 2001年1月30日

수 있는 등가 급전모델이 필요하다.

안테나에 대한 수신응답을 등가로 계산할 수 있는 기준의 급전모델로는 각주파수 영역 등가회로망(angular-frequency domain equivalent network) 모델<sup>[3]</sup>, 1차원 전송선 셀(1-D transmission-line cell) 모델<sup>[4,5]</sup>, 등가 경계조건(equivalent boundary condition)<sup>[6,7]</sup>을 이용한 모델 등이 있다. [3]에서 안테나에 대한 FDTD 해석에 주로 이용되는 델타갭(delta-gap) 모델은 급전갭에서 안테나와 선로간의 임피던스 정합을 무시한 부정확한 모델임을 제시하였으며, 등가회로망(equivalent network) 해석을 통하여 안테나의 입력 임피던스와 등가개방전압으로 구성되는 모델을 제시하였다. 이 모델은 델타갭 모델보다 적은 오차로 안테나의 시간영역 응답을 계산할 수 있으나, 부가적인 Fourier 변환(Fourier transform)을 거쳐야하는 단점을 지니고 있다. 기존문헌<sup>[4,5]</sup>는 안테나의 급전부를 1차원 전송선 방정식과 급전갭에서 만족해야하는 Maxwell 방정식을 시간영역에서 동시에 적용하는 모델을 제시하였다. 그러나 [5]에서 GPR의 응답 계산시 급전갭에 인가되는 전압의 실제 레벨을 정확하게 측정하지 못하여 계산결과와 측정자료는 정규화된 패턴으로만 비교가 가능하였다. 또한 3차원 FDTD 공간 이외에 전송선에 대한 부가적인 1차원 전송선 셀을 구성해야므로 계산용량이 증가하였다. 최근 Nishioka<sup>[6,7]</sup>는 급전선과 안테나가 연결된 상황에 대한 시간영역 등가회로를 해석함으로써 안테나의 급전갭에서 만족해야하는 전압 경계조건(voltage boundary condition)을 이용한 모델을 제시하였으며, 계산결과를 측정결과와 직접 비교함으로써 타당성을 입증하였다.

이와 같이 여러 가지 관점으로 안테나 급전부를 모델링할 수 있다. 그러나 지금까지 이러한 모델들간의 이론적인 관계와 실제 계산의 정확성과 효율성에 대한 비교가 없었다. 따라서 본 논문에서는 기준의 급전모델 간의 관계를 이론적으로 검토하고, 실제 GPR 시스템의 안테나에 대한 급전모델에 따른 FDTD 계산의 정확성과 효율성을 비교하였다.

## II. 여러 가지 급전모델에 대한 이론적 검토

그림 1은 지표면 위에 송신단과 수신단이 분리되어 bistatic mode로 동작하는 GPR 시스템의 기본 구성을 나타낸 것이다.

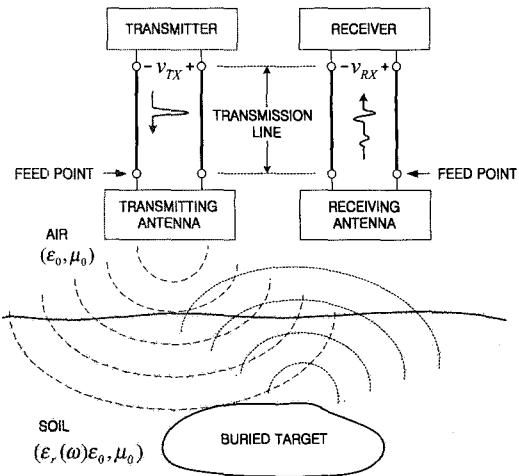


그림 1. Bistatic GPR 시스템의 구성도

Fig. 1. Geometry of a bistatic GPR system.

### 1. 각주파수 영역 모델<sup>[3]</sup>

그림 1의 두 안테나의 급전점(feed point)들을 기준으로 안테나, 공기/지하매질, 지하표적을 포함하는 공간을 2포트 등가 회로망(2-port equivalent network)으로 간주할 수 있으므로, 이 회로망에 대하여 임피던스 파라미터(impedance parameters)를 이용하여 해석할 수 있다. 여기서 GPR의 특성을 고려하면 그림 2와 같이 각주파수 영역에서 송신단과 수신단에 대한 근사형 등가 회로망 모델을 얻을 수 있다.

만일 전송선이 무손실(송신단의 전송선로의 특성 임피던스  $Z_0^{TX}(\omega) = R_0^{TX}$ , 수신단의 전송선로의 특성 임피던스  $Z_0^{RX}(\omega) = R_0^{RX}$ )이고, 송신기 ↔ 전송선, 전송선 ↔ 수신기가 완전정합(접속점에서의 반사계수  $\Gamma_{TX}(\omega)$ ,  $\Gamma_{RX}(\omega) = 0$ )이며, 전송선의 길이가 매우 짧은 경우(전송선로의 길이  $l_{TX}$ ,  $l_{RX} \approx 0$ )로 간주할 수 있다면 송신 안테나의 급전갭에 걸리는 전압  $V_{TX}^{FEED}(\omega)$ 와 수신기에 걸출되는 전압  $V_{RX}(\omega)$ 는 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$[ V_{TX}^{FEED}(\omega) ]_{Z_0^{TX}(\omega) = R_0^{TX}} \stackrel{l_{TX} \approx 0}{\approx} \frac{2 Z_{ANT}^{TX}(\omega)}{Z_{ANT}^{TX}(\omega) + R_0^{TX}} V_{TX}(\omega) \quad (1)$$

$$[ V_{RX}(\omega) ]_{Z_0^{RX}(\omega) = R_0^{RX}} \stackrel{l_{RX} \approx 0}{\approx} \frac{R_0^{RX}}{Z_{ANT}^{RX}(\omega) + R_0^{RX}} V_{RX}^{sc}(\omega) \quad (2)$$

식 (2)에 의하면 수신단에서 수신안테나의 입력 임피던스  $Z_{ANT}^{RX}(\omega)$ 와 전송선의 특성저항  $R_0^{RX}$ , 급전갭에

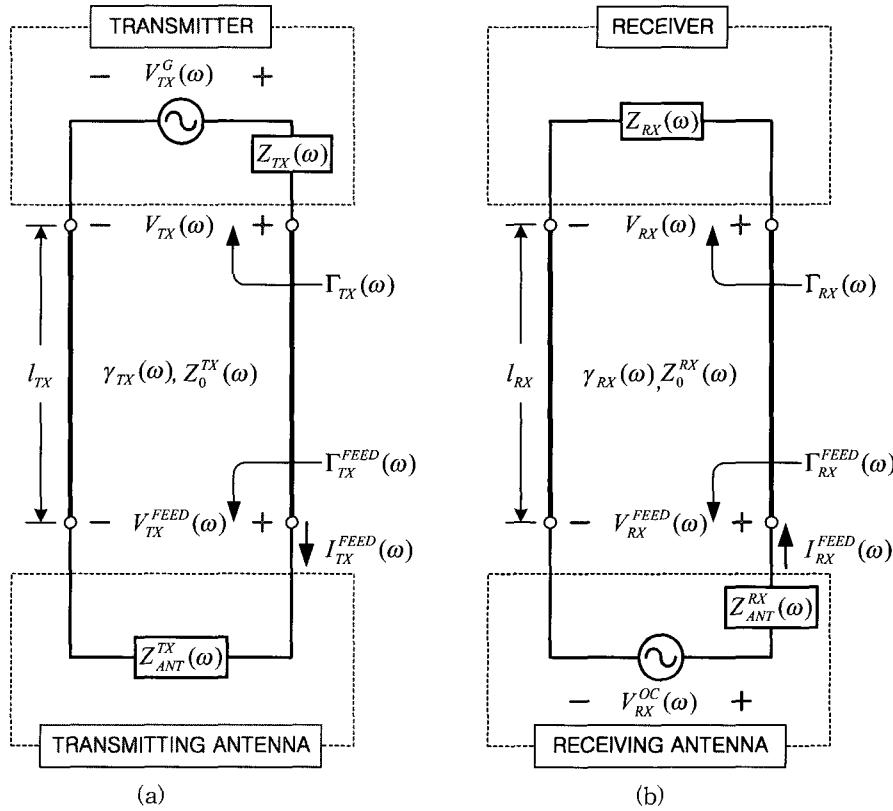


그림 2. Bistatic GPR에 대한 각주파수 영역 등가회로망 모델 (a) 송신단 (b) 수신단

Fig. 2. Equivalent network model of a bistatic GPR in angular frequency-domain. (a) Transmitting unit. (b) Receiving unit.

걸리는 등가 개방전압  $V_{RX}^{oc}(\omega)$ 를 알고 있으면 수신기에서 검출되는 전압을 계산할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 시간영역 전자기 해석기법인 FDTD에 적용 적용할 수 없으므로  $Z_{ANT}^{RX}(\omega)$  와  $V_{RX}^{oc}(\omega)$  각각을 계산하기 위한 FDTD 모의계산을 각각 따로 수행해야하고, 부가적인 Fourier 변환을 거쳐야 시간영역 수신전압  $v_{RX}(t)$ 를 구할 수 있다.

## 2. 1차원 전송선 모델<sup>[4,5]</sup>

전송선 내부에는 TEM(transverse electromagnetic)파만 전파한다고 가정할 수 있으므로, 전압과 전류에 대한 전송선 방정식으로 해석할 수 있다. 전송선 방정식에 대하여 Yee의 leap-frog 방법을 적용하여 전송선의 임의의 지점에 걸리는 전압과 전류는 각각  $n$  번째 시간,  $n+1/2$  번째 시간에 서로 엇갈려 계산되는 유한 차분으로 전개할 수 있으므로 그림 3과 같이 전압과 전류에 대한 1차원 전송선 셀을 구성할 수 있다. 송신 단의 전송선 셀은  $k' = k'_s$  지점에서  $+k'$  방향으로만 입

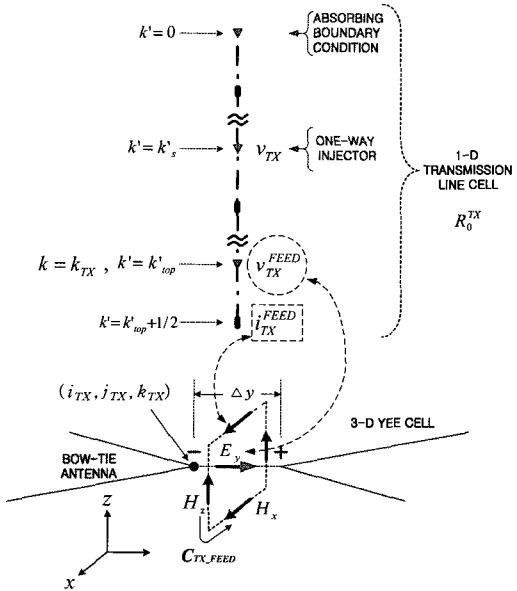


그림 3. 송신단에 대한 시간영역 1차원 전송선 셀 모델  
Fig. 3. 1-D transmission line cell model of a transmitting unit in time-domain.

사파가 진행하도록 단방향 주입기(one-way injector)를 전압원  $v_{TX}$ 로 모델링할 수 있다.  $k=0$ 인 지점에는 급전캡에서 발생하는 반사파가 흡수되도록 흡수경계조건(ABC; absorbing boundary condition)을 적용하므로써 급전선을 등가로 해석할 수 있다. 이와 같은 전송선 셀에 대한 자세한 내용은 참고문헌<sup>[4]</sup>에서 다루고 있으므로 본 논문에서는 생략하였다.

급전캡은 전압과 전류에 대한 1차원 전송선 셀과 전계와 자계에 대한 3차원 Yee 셀의 경계부분으로 등가모델링이 매우 중요하다. 그림 3과 같이 안테나의 급전캡이  $y$ 축 방향으로 한 셀 간격  $\Delta y$ 인 경우로 모델링하면 이러한 캡은 인가전원의 파장에 비하여 매우 작으므로 Faraday의 법칙과 Ampère의 법칙에 의하여 급전캡에서 1차원 전송선 셀의 끝단인 급전전압과 급전전류를 각각 3차원 공간상의 전계와 자계간의 관계로 각각 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$E_y^n(i_{TX}, j_{TX} + 1/2, k_{TX}) = -v_{TX}^{FEED}(n, k_{top}) / \Delta y \quad (3)$$

$$\begin{aligned} i_{TX}^{FEED}(n+1/2, k_{top} + 1/2) &= \\ &\left[ H_x^{n+1/2}(i_{RX}, j_{RX} + 1/2, k_{RX} + 1/2) \right] \Delta x \\ &- \left[ H_x^{n+1/2}(i_{TX}, j_{TX} + 1/2, k_{TX} - 1/2) \right] \Delta x \\ &- \left[ H_z^{n+1/2}(i_{TX} + 1/2, j_{TX} + 1/2, k_{TX}) \right] \Delta z \\ &- \left[ H_z^{n+1/2}(i_{TX} - 1/2, j_{TX} + 1/2, k_{TX}) \right] \Delta z \end{aligned} \quad (4)$$

수신단의 경우에는 송신단과 동일한 방법으로 모델링할 수 있으며, 단지 인가전압  $v_{TX}=0$ 이라 둔 경우에 해당한다.

따라서 급전선으로 사용한 전송선 내부는 전압과 전류에 대한 1차원 전송선 셀로 계산하고, 안테나를 포함한 공간은 전계와 자계에 관한 3차원 Yee 셀로 계산하며, 1차원 셀과 3차원 셀의 경계를 이루는 안테나의 급전캡에 대해서는 식 (3)과 (4)를 적용하므로써 안테나에 연결된 급전선의 특성을 시간영역에서 등가로 고려할 수 있다.

### 3. 전압 경계조건 모델<sup>[6,7]</sup>

1절의 식 (1)과 식 (2)에서 두 안테나의 입력 임피던스를 급전전압과 급전전류의 비로 정의하고, 두 식에 대하여 역 Fourier 변환(inverse Fourier transform)을 적용하면 이산시간  $t = n\Delta t$ 에서 각각 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$\begin{aligned} v_{TX}^{FEED}(n) &= 2v_{TX}(n) - R_0^{TX} i_{TX}^{FEED}(n) \\ &\approx 2v_{TX}(n) - R_0^{TX} i_{TX}^{FEED}(n-1/2) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} v_{RX}(n) &= v_{RX}^{FEED}(n) = R_0^{RX} i_{RX}^{FEED}(n) \\ &\approx R_0^{RX} i_{RX}^{FEED}(n-1/2) \end{aligned} \quad (6)$$

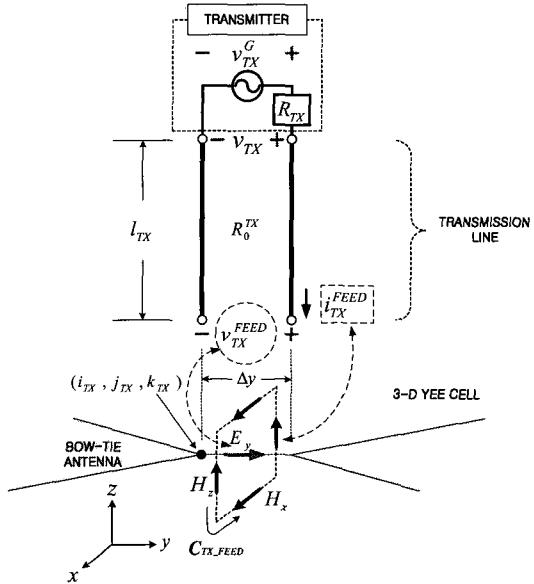


그림 4. 송신단에 대한 시간영역 전압 경계조건 모델  
Fig. 4. Voltage boundary condition model of a transmitting unit in time-domain.

식 (5)는 그림 4와 같이 표현할 수 있으며,  $v_{TX}^{FEED}(n)$ 은 송신안테나의 급전 캡에 걸리는 총전압(total voltage)을 나타내며, 이는 입사전압(incident voltage)  $v_{inc}(n) = v_{TX}(n)$ 과 반사전압(reflected voltage)  $v_{refl}(n) = v_{TX}(n) - R_0^{TX} i_{TX}^{FEED}(n) \approx v_{TX}(n) - R_0^{TX} i_{TX}^{FEED}(n-1/2)$ 의 합으로 구성된다. 반사전압은 급전캡에 입사된 전압과 이 캡에 걸리는 전계를 둘러싸는 자계 성분의 선적분으로 정의되는 총전류(total current)  $i_{TX}^{FEED}(n-1/2)$ 에 의해서 결정됨을 알 수 있다. 여기서 FDTD는 leap-frog 방법에 의하여 전계와 자계가 1/2 시간 step 차이를 두고 계산되므로, 전압과 전류도 1/2 시간 step을 이룬다. 따라서 식 (5)와 식 (6)에서  $n$  시간의 전압을 계산할 때 이용되는 전류는  $n-1/2$  시간의 값으로 근사화 해야한다. 수신단의 급전전압을 나타내는 식 (6)은 송신단에 대한 식 (5)에서 인가전압  $v_{TX}=0$ 으로 둔 것과 동일하며, 단지 전류의 방향만 반

때이다. 식 (5)는 1차원 전송선 셀 방정식과 식 (3)과 식 (4)를 동시에 푸는 것과 등가를 이루는 일종의 전압 경계조건임을 알 수 있다. 따라서 식 (5)와 식 (6)과 같은 전압 경계조건을 각각 송신과 수신안테나의 급전 캡에 걸리는 전압을 계산하는데 적용하므로써 앞의 2 절에서 다룬 1차원 전송선 셀 모델처럼 급전선에 대한 부가적인 FDTD 영역을 구성하지 않더라도 안테나에 급전선이 연결된 특성을 등가로 계산할 수 있으므로 계산용량이 절감된다.

### III. 수치계산 결과와 측정자료의 비교

앞의 II절에서 언급한 3가지 급전모델의 특성을 비교하기 위하여 [8]에서 제시한 상황과 마찬가지로 동일 구조인 두 안테나<sup>[9]</sup>가 지하매질(본 논문에서는 마른 모래)의 표면으로부터 2cm 높이에 안테나 중심간의 거리가 10cm를 이루는 bistatic GPR 시스템을 실험실에 마련하고, 동일한 상황에 대하여 FDTD 모의계산을 수행하였다. 또한 지하표적으로 도체판( $14.6\text{cm} \times 14.6\text{cm} \times 1\text{cm}$ )이 마른 모래 속의 5cm 깊이에 매설된 상황에 대해서도 조사하였다. II절에서 다룬 등가 급전모델들은 다음과 같은 조건을 만족하는 경우에는 서로 등가 관계가 성립한다. 1) 송신기-전송선, 전송선-수신기가 서로 완전정합을 이루고, 2) 전송선의 길이가 무시할 수 있을 정도로 매우 짧은 무손실 선로로 다룰 수 있어야 한다. 따라서 본 논문은 송신기의 출력단에 급전선으로 사용한 전송선을 연결하고, 급전선의 반대편에서 측정한 전압을 FDTD 계산의 입사전압  $v_{inc}$ 로 인가함으로써 위의 2가지 조건을 실험상에서 등가로 고려할 수 있었다<sup>[8]</sup>.

기존문헌<sup>[8]</sup>과 같이 실험실에 마련한 GPR 시스템에 대한 FDTD 계산과 II절에서 다룬 3가지 급전모델을 각각 적용한 경우에 수신전압을 다음과 같은 과정으로 구하였다. 첫 번째로 각 주파수 영역 모델을 이용한 경우에는 그림 5와 같은 과정을 수행하였다. 모델을 구성하는 파라미터(parameter)들은 기존문헌<sup>[3]</sup>에서 다룬 바와 마찬가지 방법으로 다음과 같이 구하였다. 우선 안테나의 입력 임피던스  $Z_{ANT}^{RX}(\omega)$ 는 그림 5의 좌측(FDTD 모의계산 #1)에 제시한 과정처럼 지하매질, 지하표적이 존재하는 상황에 지표면 위에 하나의 안테나만 위치한 경우 대한 FDTD 모의계산을 수행한 후 안테나의 급전전압과 급전전류의 Fourier 변환 비로 구

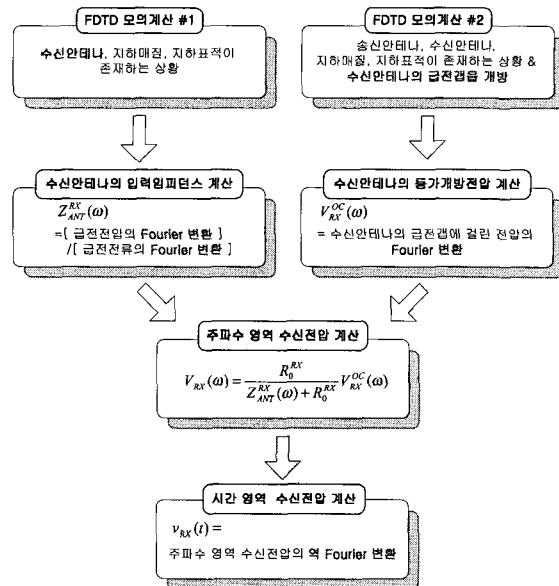


그림 5. 각 주파수 영역 등가회로망 모델을 이용한 GPR 시스템의 수신전압의 계산 과정

Fig. 5. Computation procedure of the received voltage of a GPR system using an equivalent network model in angular frequency domain.

할 수 있다. 본 논문에서는 송·수신안테나의 구조와 안테나 주변상황이 모두 동일한 경우를 다루었으므로 두 안테나의 입력 임피던스도 동일한 값을 갖는다. 따라서 단 한번의 FDTD 모의계산만으로도 두 안테나의 입력 임피던스를 구할 수 있었다. 등가방전압  $V_{RX}^{OC}(\omega)$ 는 그림 5의 우측(FDTD 모의계산 #2)과 같이 지하탐사 레이더 시스템이 위치한 전체 상황에서 단지 수신안테나의 급전캡이 개방된 경우에 대한 수신전압을 FDTD 모의계산으로 계산한 후 Fourier 변환을 수행함으로써 구할 수 있었다. 이와 같은 과정을 거쳐 송신단과 수신단에 대한 각주파수 영역 등가회로를 그림 2와 같이 구성할 수 있었으며, 식 (2)를 적용하여 주파수 영역 수신전압을 구할 수 있었다. 이에 대한 역 Fourier 변환으로 수행함으로써 시간영역 수신전압을 계산할 수 있었다. 두 번째로 시간영역 1차원 전송선 셀 모델을 이용한 경우에는 그림 6과 같은 과정을 수행하였다. 급전선으로 사용한 전송선 내부의 전압과 전류에 대한 1차원 전송선 셀에 대한 유한차분 방정식으로 다를 수 있었으며, 안테나를 포함한 3차원 공간은 전계와 자계에 관한 3차원 Yee 셀로 모델링 하였다. 특히 1차원 셀과 3차원 셀의 경계를 이루는 안테나의

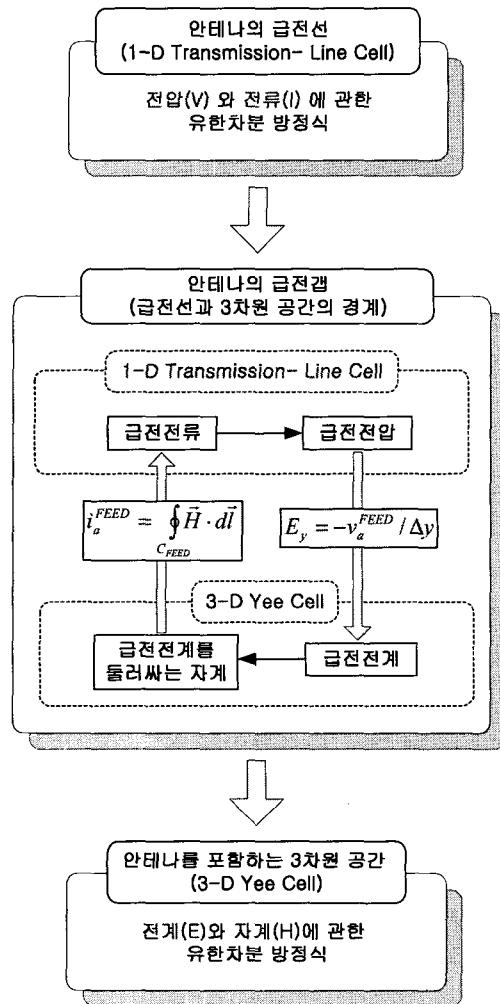


그림 6. 1차원 전송선 셀 모델을 이용한 GPR 시스템의 수신전압의 계산 과정

Fig. 6. Computation procedure of the received voltage of a GPR system using 1-D transmission line cell model.

급전갭에 대해서는 식 (3)과 식 (4)와 같이 급전전압  $\leftrightarrow$  급전전계, 급전전계를 둘러싸는 자계  $\leftrightarrow$  급전전류간의 관계로 정의함으로써 급전선이 연결된 GPR 안테나의 특성을 시간영역에서 등가로 고려할 수 있었다. 세 번째로 전압 경계조건을 이용한 경우에는 그림 7에 제시한 과정처럼 급전점에서의 전류와 전압간의 관계를 식 (5)[수신단에 대해서는 식 (6)]와 같은 전압에 대한 경계조건으로만 정의하면 되므로, 급전선을 FDTD 공간상에 따로 모델링하지 않아도 된다. 급전전압  $\leftrightarrow$  급전전계, 급전전계를 둘러싸는 자계  $\leftrightarrow$  급전전류와의 관계는 1차원 전송선 셀 모델과 동일한 방법으로 각각 식 (3)

과 식 (4)를 적용함으로써 급전선의 특성을 FDTD 계산에서 직접 고려할 수 있었다. 그림 6과 그림 7에서 a는 송신안테나인 경우에는 TX이고 수신안테나를 다루는 경우에는 RX를 나타내며, 특히 그림 7에서 a=RX 일 때는  $v_a = 0$ 이다.

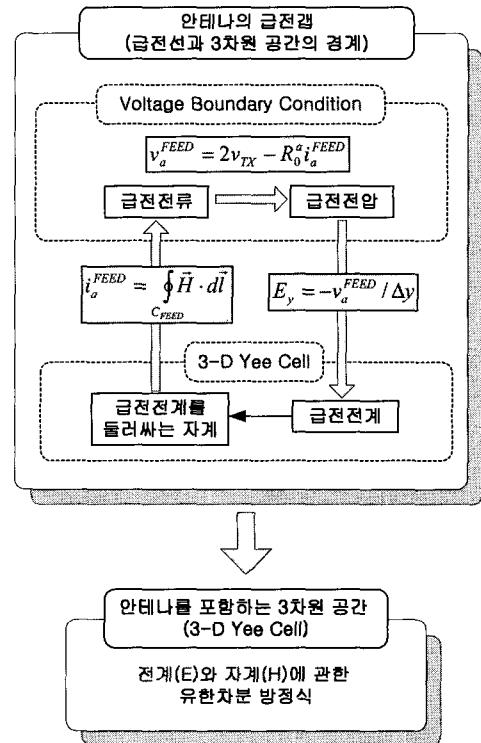


그림 7. 전압 경계조건 모델을 이용한 GPR 시스템의 수신전압의 계산 과정

Fig. 7. Computation procedure of the received voltage of a GPR system using voltage boundary condition model.

위와 같은 방법으로 각각의 급전모델에 따라 실험실에 마련한 GPR 시스템의 상황에 대한 FDTD 모의계산을 수행하였다. 비교상황으로는 지하표적이 존재하지 않는 경우와 지하표적으로 도체판이 존재하는 상황에 대한 시간영역 수신전압과 주파수 영역  $|S_{21}(f)|$ 을 급전모델에 따라 계산결과와 실제 측정자료를 각각 그림 8과 그림 9와 같이 나타내었다. 그림 8과 9에 따르면 3 가지 급전 모델에 따라 계산된 결과는 모두 패턴과 레벨이 거의 일치하였으며, 측정자료와는 약간의 차이를 보였다. 측정자료를 기준으로 각각의 급전모델을 적용한 경우에 대하여 지하표적이 존재하지 않는 상황과

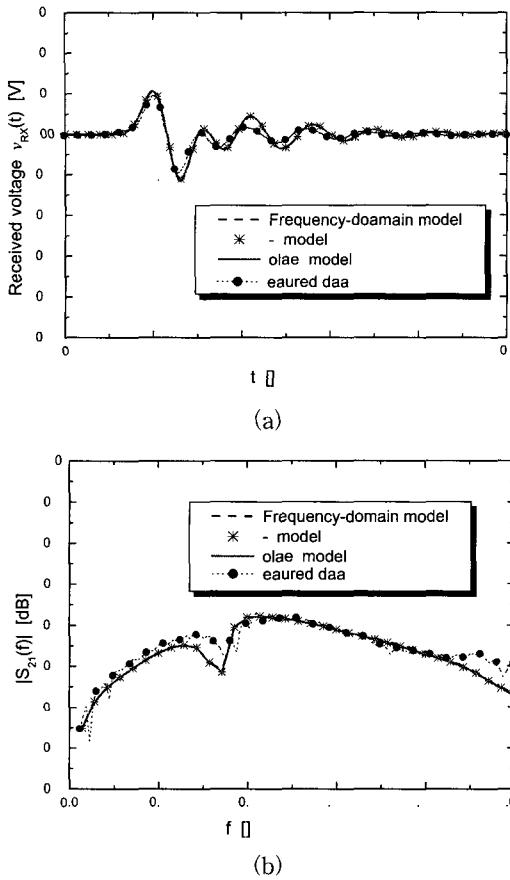


그림 8. 지하표적이 존재하지 않는 경우 급전모델에 따른 계산결과와 측정자료의 비교 (a) 수신 전압 (b)  $|S_{21}(f)|$

Fig. 8. Comparison of measured data and calculated results according to equivalent feed models in case that no target is buried. (a) Received voltage. (b)  $|S_{21}(f)|$ .

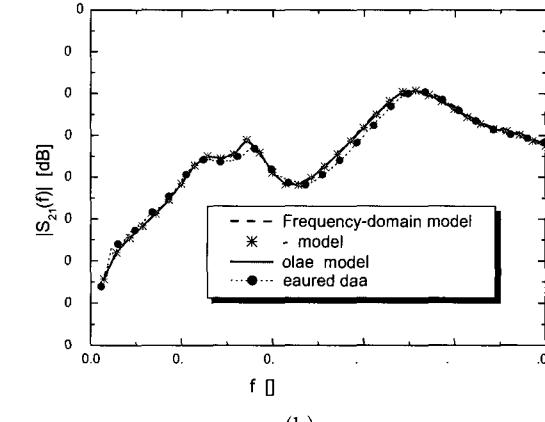
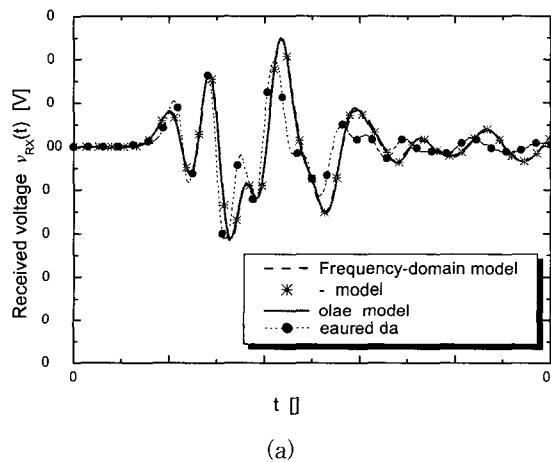


그림 9. 5cm깊이에 도체판이 매설된 경우 급전모델에 따른 계산결과와 측정자료의 비교 (a) 수신 전압 (b)  $|S_{21}(f)|$

Fig. 9. Comparison of measured data and calculated results according to equivalent feed models in case that metallic-plate target is buried at the depth of 5 cm. (a) Received voltage. (b)  $|S_{21}(f)|$ .

표 1. 등가 급전모델에 따른 GPR 시스템의 수신전압 계산의 정확성

Table 1. Accuracy of the calculation of the received voltages in time-domain according to equivalent feed models.

Feed Model	시간영역 수신전압 $v_{RX}(t = n \Delta t)$ 계산의 최대 절대오차 $\Delta V_{RX, max} =$ $\max( v_{RX}^{measured} - v_{RX}^{calculated} )$ [V]	
	지하표적이 없는 경우	지하표적이 존재하는 경우
Frequency -Domain	0.05834	0.13703
1-D TL Cell	0.05780	0.14262
Voltage BC	0.05778	0.14162

지하표적이 존재하는 상황에 대한 최대 절대오차 (absolute error)를 계산하면 표 1과 같다. 표 1의 결과에 의하면 급전모델에 따른 오차는 거의 비슷함을 알 수 있으며, 지하표적이 존재하는 경우에는 존재하지 않는 경우보다 오차가 약간 증가하였다. 표 1에서 오차의 크기를 살펴보면 지하표적이 없는 경우에 급전모델로 각주파수 영역 등가회로망 모델을 적용하면 측정값보다 0.05834V 높게 계산되었고, 1차원 전송선 모델과

전압 경계조건 모델은 각각 0.05780V, 0.05778V로서 각주파수 영역모델보다 조금 낮은 오차를 보였으며, 전압 경계조건 모델은 1차원 전송선 셀 모델보다 약 0.00002V 정도 낮은 오차를 보였다. 이와 같은 오차의 원인으로는 FDTD 계산에서 모래 표면과 안테나가 완전한 평면을 이루는 경우로 모델링 해야 하고, 지하매질로 사용한 마른 모래에 대해 측정한 복소 유전율과 인가신호로 사용한 펄스를 근사로 모델링 하였기 때문에 실제 실험 상황과의 차이에서 발생한 것으로 추정된다. 또 다른 비교 상황이었던 지하표적이 존재하는 경우에는 존재하지 않는 경우보다 약 2.3배 가량 오차가 증가하였으며, 급전모델에 따라서는 각주파수 영역 모델이 오차가 가장 적었으며, 전압 경계조건 모델이 가장 큰 오차를 보였다. 지하표적이 존재하는 경우에 존재하지 않는 경우보다 오차가 조금 더 크게 나타나는 것은 실험에서 지하표적이 묻혀있는 깊이와 놓여있는 면이 FDTD 모델처럼 완전한 평면으로 위치시키기 어렵기 때문에 생긴 것으로 생각된다. 이러한 오차 상황에도 불구하고 전체적인 관점에서 패턴과 레벨이 거의 유사하므로 GPR 시스템의 상황에 대한 해석이 매우 유용함을 알 수 있었다. 실제 측정상황에 대한 좀더 정확한 모델링을 수행하면 지금보다 개선된 결과를 얻을 수 있을 것이다. 표 1과 같은 측정과 FDTD 계산에 대한 오차의 원인에 대한 좀더 자세한 분석은 추후의 논문 주제로 다룰 것이다. 그럼 8과 그림 9의 시간 영역 수신전압을 계산하는데 실제 수행한 계산과정과 계산용량을 각각의 급전모델에 따라 나타내면 표 2와 같다. 표 2에 따르면 각주파수 영역 등가회로망 모델은 안테나의 임피던스와 수신안테나의 급전캡에 걸리는 개방전압을 구하기 위해서 동일한 크기의 3차원 공간에 대하여 2번의 FDTD 모의계산을 독립적으로 수행해야하고, 부가적인 Fourier 변환 과정을 거쳐야 시간 영역 수신전압을 계산할 수 있었다. 이와는 달리 1차원 전송선 셀 모델과 전압 경계조건 모델은 단 한번의 FDTD 계산만으로 직접 급전선의 특성을 고려할 수 있으므로 각 주파수 영역 모델보다 계산과정과 계산용량이 약 절반만 필요하므로 매우 효율적이다. 특히 전압 경계조건 모델은 급전선에 대한 모델링을 급전전압과 급전전류간의 관계식 하나로만 정의하면 되므로, 1차원 전송선 셀 모델처럼 FDTD 계산시 급전선에 대한 부가적인 1차원 셀을 구성하지 않고서도 시간영역 수신전압을 계산할 수 있으므로 계산용량이 절감된다.

따라서 전압 경계조건을 이용한 급전모델이 GPR 시스템처럼 안테나를 포함하는 상황에 대한 3차원 FDTD 해석에 매우 효율적이다.

표 2. 등가 급전모델에 따른 FDTD 모의계산의 효율성

Table 2. Efficiency of the FDTD simulation according to equivalent feed models.

Model Feed	시간영역 수신전압 $v_{RX}(t = n \Delta t)$ 의 계산 과정		
	FDTD		Fourier Transform
	계산영역 ( $N_x \times N_y \times N_z$ )	계산 횟수	
Frequency -Domain	3차원 공간 : 68×42×35 셀	2번	필요
1-D TL Cell	3차원 공간 : 68×42×35 셀	1번	불필요
	1차원 : 200 셀		
Voltage BC	3차원 : 68×42×35 셀	1번	불필요

#### IV. 결 론

본 논문에서는 GPR처럼 안테나를 포함하는 상황에 대한 FDTD 해석에 적합한 등가 급전모델들간의 관계를 이론적으로 검토하고, 실제 측정과 동일한 상황에 대하여 급전모델에 따른 FDTD 모의계산 결과를 비교하였다.

안테나에 대한 시간영역 응답을 등가로 계산할 수 있는 대표적인 급전모델로는 각주파수 영역 등가회로망 모델, 시간영역 1차원 전송선 셀 모델, 전압 경계조건 모델이 있다. 송신기 ↔ 전송선, 전송선 ↔ 수신기가 서로 완전정합을 이루고, 전송선의 길이가 무시할 수 있을 정도로 매우 짧은 무손실 선로로 간주할 수 있는 경우에는 이론상으로 3가지 모델이 서로 등가관계가 성립하였다. 각주파수 영역 등가회로망 모델은 수신안테나의 입력 임피던스와 급전캡에 걸리는 등가개방전압을 구하기 위한 FDTD 모의계산을 각각 따로 수행해야하고, 부가적인 Fourier 변환 과정을 거쳐야 GPR 시스템의 수신기에서 검출되는 전압을 계산할 수 있었다. 이와는 달리 시간영역 1차원 전송선 셀 모델과 전압 경계조건 모델은 FDTD 계산에 직접 적용이 가능하므로 한번의 모의계산만으로도 수신응답을 계산할 수 있었다. 특히 전압 경계조건 모델은 급전캡의 전계

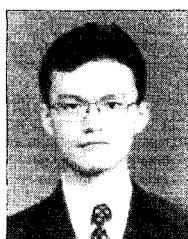
를 계산하는 유한차분 식에 대해서만 전압 경계조건을 적용하면 되므로, 1차원 전송선 셀 모델처럼 3차원 FDTD 공간이외에 부가적인 1차원 셀이 필요하지 않으므로 계산용량이 절감된다. 따라서 측정과 동일한 GPR 상황에 대하여 급전모델에 따른 FDTD 모의계산 자료를 비교한 결과 정확성은 거의 동일한 반면에, 계산의 효율성 면에서는 전압 경계조건을 이용한 급전모델이 가장 우수하였다. 이와 같이 GPR처럼 안테나를 포함하는 상황에 대한 FDTD 해석에서 전압에 대한 등가 경계조건을 이용한 급전모델이 정확성을 보장하면서 계산용량을 절감할 수 있으므로 매우 유용함을 알 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- [1] D. J. Daniels, D. J. Gunton, and H. F. Scott, "Introduction to subsurface radar," *Proc. IEE*, vol. 135, pt. F, no. 4, pp. 278-320, Aug. 1988.
- [2] K. S. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-14, no. 3, pp. 302-307, May 1966.
- [3] 현승엽, 김상우, 김세운, "동기회모방 모델을 이용한 Bistatic 지하탐사 레이더 시스템의 수신응답 해석" *대한전자공학회 논문지*, 제 37권, TC편, 제 6호, 44-53쪽, 2000
- [4] J. G. Maloney, K. L. Shlager, and G. S. Smith, "A simple FDTD model for transient excitation of antennas by transmission lines," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-42, no. 2, pp. 289-292, Feb. 1994.
- [5] J. M. Bourgeois and G. S. Smith, "A fully three-dimensional simulation of a ground-penetrating radar: FDTD theory compared with experiment," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. GRS-34, no. 1, pp. 36-44, Jan. 1996.
- [6] 西岡 泰弘, 宇野 亨, "地中レーダにおけるフェライトの効果," *電子情報通信學會 信學技報 A* · pp. 98-122, pp. 7-12, 1998 12
- [7] Y. Nishioka, O. Maeshima, T. Uno, and S. Adachi, "FDTD analysis of resistor-loaded bow-tie antennas covered with ferrite-coated conducting cavity for subsurface radar," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-47, no. 6, pp. 970-977, June 1999.
- [8] 현승엽, 김세운, 김영식, "지하침투 레이더의 FDTD 모의계산 결과와 측정자료의 비교," *대한전자공학회 논문지*, 제 36권, D편, 제 7호, 1-8쪽, 1999
- [9] 현승엽, 김상우, 김세운, "자체 설계한 안테나로 구성된 GPR의 파이프 검출능력에 관한 측정," *대한전자공학회 논문지*, 제 36권, D편, 제 3호, 19-26쪽, 1999

---

### 저 자 소 개



玄 昇 燁(學生會員) 第36卷 D編  
第3號 參照  
현재 고려대학교 대학원 전파공학  
과 박사과정 재학중

金 世 潤(正會員) 第32卷 A編 第6號 參照  
현재 한국과학기술연구원 영상미디어연구센터 책임연  
구원