

개선된 가상의 전송선로 모델의 오차 연구

A Study on the Errors for the Improved Version of the Virtual Transmission-Line Model

조 유 선 · 김 세 윤 · 김 영 식*

Yu-Sun Jo · Se-Yun Kim · Young-Sik Kim*

요 약

개방단말 동축선 프로브법은 측정매질에 가공없이 접촉하여 매질의 전기적인 특성을 측정할 수 있는 효과적인 방법이다. 프로브 단말면에서 측정된 임의의 매질의 반사계수는 등가모델에 의해 복소 유전율로 환산되는데 본 실험실에서는 이미 개선된 가상의 전송선로 모델을 제안한 바 있다. 그런데 이 등가모델에 의해 환산된 복소 유전율은 주파수가 올라갈수록 오차가 증가하였다. 개방단말 동축선 프로브법에서의 복소 유전율 오차는 프로브의 불완전 접촉, 프로브의 제작 오차 등과 같은 여러 가지 원인에 의해 복합적으로 발생한다. 본 논문에서는 반사계수를 FDTD(Finite-Difference Time-Domain) 기법으로 수치계산하여 반사계수 측정 시 발생할 수 있는 여러 오차를 제거하여, 오차의 원인을 환산모델의 문제로 제한시켰다. 그리고 환산모델에 의한 오차의 발생 여부를 여러 각도에서 연구하였다. 첫 번째로 반복법으로 계산된 환산모델의 변수에 대한 local minimum을 확인하였다. 두 번째로는 사용 주파수 범위에서 등가 모델의 모델링 여부를 확인하였다. 이러한 연구로부터 현재 사용하는 개선된 가상의 전송선로 모델의 사용범위를 알 수 있다.

Abstract

An open-ended coaxial probe method has been considered as one of effective tools for measuring electrical properties of its contacted material without shaping and fitting. The measured reflection coefficient at the probe's end is able to convert into the corresponding complex permittivity by employing the improved version of virtual transmission-line model presented by our lab already. But the error of complex permittivity converted by equivalent model increases as the operating frequency ascends high. The errors of complex permittivity in the open-ended coaxial probe can be yielded compositively by the imperfect contact of probe, manufacture error of probe and complex permittivity error of reference material etc. Therefore it is necessary to limit the problem to identify the error causes in high frequency. In this paper, the errors which are resulted from the measurement of reflection coefficient are removed by using the FDTD(Finite-Difference Time-Domain) method, the error causes are limited the conversion model problem. And the error study of the improved conversion model is performed from several viewpoints. At first, the local minimum of parameter to be calculated by the iteration method in the conversion model is checked. At second, the modeling of the equivalent model is checked in the frequency range. From this study, we know the valid range of the improved conversion model.

Key words : Complex Permittivity, Error of Conversion Model, Local Minimum, Equivalence

한국과학기술연구원 영상미디어연구센터(Imaging Media Research Center, KIST)

*고려대학교 전파공학과(Dept. of Radio Sciences and Eng., Korea Univ.)

· 논문 번호 : 20020509-057

· 수정완료일자 : 2002년 9월 24일

I. 서 론

복소 상대 유전율(complex relative permittivity) $\epsilon_m = \epsilon_m' - j\epsilon_m''$ 은 매질의 전기적인 특성을 나타내는 파라미터로서 실수부분인 유전율(permittivity) ϵ_m' 과 도전율(conductivity) σ 를 포함하는 허수부분인 ϵ_m'' 의 합으로 표현된다. 여기서 ϵ_m' 와 ϵ_m'' 은 각각 해당 매질 내에서 전기신호의 전파 속도와 손실 정도를 결정한다. 따라서 복소 유전율의 측정 기술은 무선통신, 이동통신, 위성통신 등 여러 통신 분야의 기초를 이루는 전자재료 · RF 부품 · microwave 소자의 설계, 안테나 및 레이더 측정 등에 널리 사용되고 있다^{[1][2]}.

본 연구실에서는 펄스의 송수신 응답으로부터 지하에 매설된 물체(object)의 위치, 모양, 크기, 재질 등의 정보를 추출할 수 있는 GPR(Ground- Penetrating Radar) 시스템^[3]을 개발해 오고 있다^[4]. 문제는 숨겨진 물체를 가장 잘 탐지할 수 있는 GPR 시스템을 개발하는 것인데 그 중에서도 송 · 수신 안테나를 최적 설계하는 것이 매우 중요하다. 본 연구실에서는 이를 위하여 FDTD(Finite-Difference Time-Domain)^[5]기법을 이용하여 GPR 시스템, 배경매질, 숨겨진 물체, 모두를 모델링하여 GPR 시뮬레이터를 개발하였다. 그런데 GPR 시뮬레이터를 작동시키기 위해서는 배경매질(흙, 모래)의 복소 유전율을 광대역에 걸쳐 알아야 했다^[4]. 동축선 프로브법은 광대역에서의 복소 유전율 측정이 매질의 가

공없이 이뤄지므로 빠르고 간편하게 사용할 수 있어서 지하매질의 측정법으로 알맞다^{[6]~[8]}. 배경매질에 개방단말 동축선 프로브를 접촉시키고 측정된 반사계수는 환산모델에 의해 복소 유전율로 환산할 수 있다^[9].

본 연구실에서는 기존의 가상의 전송선로 모델^[9]을 개선한 새로운 가상의 전송선로 모델^[10]을 제안한 바 있다. 본 논문에서는 이 환산모델을 '개선된 가상의 전송선로 모델'이라고 명명한다. 이 환산모델의 변수는 복소 유전율을 이미 알고 있는 2 가지 매질(기준매질: 공기, 증류수)로부터 반복법(iteration method)을 사용하여 계산한다. 본 논문에서는 계측기 오차와 프로브의 접촉 오차 등^[11]을 제거하기 위해서 FDTD기법으로 반사계수를 수치계산하였다. 그런데 수치계산된 가상의 전송선로 모델에 대입하여 복소 유전율을 계산하면 주파수가 올라감에 따라 오차가 급격히 증가하였다. 본 논문에서는 개선된 가상의 전송선로 모델에 의한 복소 유전율의 오차의 원인을 규명하였다.

II. 개선된 가상의 전송선로 모델

본 논문에서의 상대 복소 유전율을 간단히 복소 유전율이라 하겠다. 개방단말 동축선 프로브법으로 복소 유전율을 측정할 때 발생하는 오차는 프로브의 불완전 접촉, 프로브의 제작 오차, 계측기의 측정 오차 등에 의해 발생한다. 따라서 이러한 오차를 제

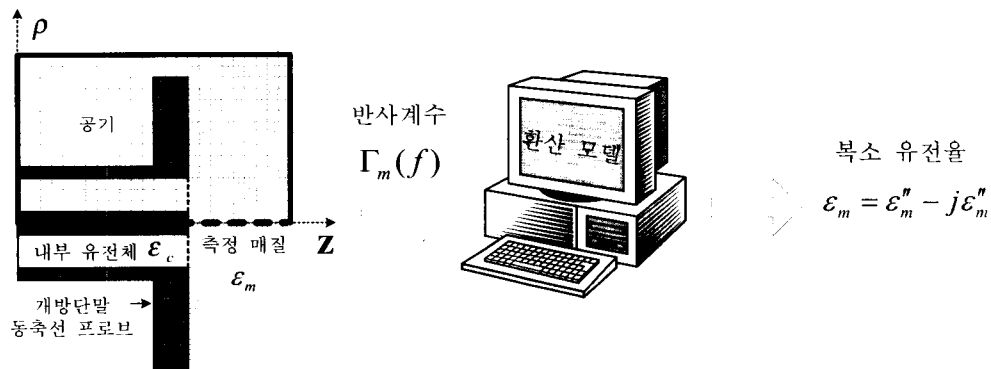


그림 1. 복소 유전율 계산과정
Fig. 1. Calculation process for the complex permittivity.

거하고 이상적인 상황에서의 복소 유전율을 얻기 위해서 측정매질에 완전히 접촉해 있는 프로브의 단말면에서의 반사계수를 FDTD 기법^[5]으로 수치계산하였다. 그림 1은 개방단말 동축선 프로브를 이용하여 측정 매질의 복소 유전율을 수치계산하는 과정을 나타낸다. TEM 모드의 동축선은 동심축선으로 대칭이므로 FDTD 계산영역은 그림 1에서 좌측 단면도의 상단부에 해당된다. 동축선에 입사된 파 $v_{in}(t)$ 와 반사된 파 $v_{ref}(t)$ 의 각각을 FFT(Fast Fourier Transform)하여 비를 취함으로써 프로브의 반사계수 $\Gamma_m(f)$ 를 식 (1)과 같이 정의한다.

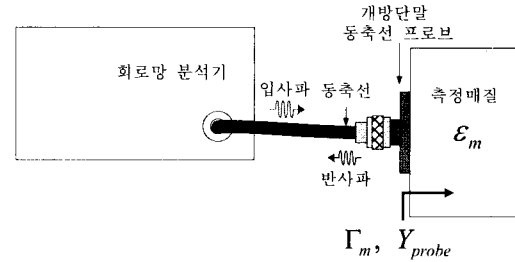
$$\Gamma_m(f) = \frac{FFT(v_m(t))}{FFT(v_{ref}(t))} = |\Gamma_m(f)| \angle \phi_{\Gamma_m} \quad (1)$$

수치계산한 반사계수를 환산모델에 대입하여 복소 유전율을 환산한다. 본 실험실에서 기존의 가상의 전송선로 모델^[9]을 개선한 새로운 가상의 전송선로 모델을 제안한 바 있다^[10].

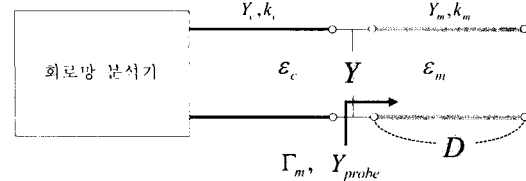
프로브 단말면에서의 반사계수는 측정매질의 복소 유전율로 환산할 수 있는 관계식을 개선된 가상의 전송선로 모델에 의해 생성된다. 개선된 가상의 전송선로 모델은 그림 2(a)의 프로브 개구면에서 측정매질을 바라보았을 때의 입력 어드미턴스 Y_{probe} 와 그림 2(b)에서 가상의 전송선로 모델의 입력 어드미턴스 Y_{probe} 가 등가이도록 다음과 같이 변수들을 만든다. 먼저 그림 2(a)에서 동축선 단말면에서의 불연속을 그림 2(b)를 정규화된 어드미턴스 Y_{eq} 로 나타낸다. 그리고 ϵ_m 의 측정매질에 해당하는 부분을 그림 2(b)와 같이 끝이 개방되고 길이가 D 인 가상의 전송선로로 등가화 한다^[10]. 그러므로 그림 2(a)의 개방단말 동축선 프로브의 단말 경계면에서의 입력 어드미턴스 Y_{probe} 은 그림 2(b)에서 전송선로 이론에 의해 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} Y_{probe} &= \frac{1 - \Gamma_m}{1 + \Gamma_m} Y_c \\ &\approx Y_{eq} + Y_{in} \\ &= \frac{Y}{60 \ln(b/a)} + jY_m \tan(k_m D) \quad (2) \end{aligned}$$

여기서 a 와 b 는 각각 동축선 내심과 외심의 반지름이고, $Y_c (= \frac{\sqrt{\epsilon_c}}{60 \ln(b/a)})$ 와 $Y_m (= \frac{\sqrt{\epsilon_m}}{60 \ln(b/a)})$



(a) 개방단말 동축선 프로브와 측정매질
(a) An open-ended coaxial probe and measurement material



(b) 개선된 가상의 전송선로 모델
(b) The improved version of the virtual transmission-line model

그림 2. 개선된 가상의 전송선로 모델
Fig. 2. The improved version of the virtual transmission-line model.

은 각각 동축선과 가상의 전송선로의 특성 어드미턴스(characteristic admittance)이다. Γ_m 은 프로브의 단말면에서의 반사계수이다. $k_m (= \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \sqrt{\epsilon_m})$ 은 가상의 전송선의 복소 파수(complex wave number)이다. 식 (2)에서 우변의 첫번째 항은 매질 불연속면에 대한 등가 어드미턴스이고, 두번째 항은 끝이 개방되어 있고 길이가 D 인 전송선로에서 측정매질의 바라본 입력 어드미턴스 Y_{in} 이다.

III. 반복기법

측정매질의 반사계수를 복소 유전율로 환산하기 위해서 등가 변수인 Y 와 D 를 먼저 구해야 한다. 복소 유전율을 이미 알고 있는 매질(이를 기준 매질이라고 부름)로부터 등가화 변수를 계산한다. 기준 매질은 주위에서 구하기 쉬운 공기와 증류수(의료용)를 선택하였는데, 공기는 일반적인 매질 중에 복소 유전율이 가장 낮은 매질이고 증류수의 경우에는 가장 높은 매질이다. 분산 특성을 갖는 매질의

복소 유전율은 다음과 같은 Debye 공식으로 나타낼 수 있다^[12].

$$\epsilon_m(f) = \epsilon_{m\infty} + \frac{\epsilon_{ms} - \epsilon_{m\infty}}{1 + j2\pi f \tau_m} - j \frac{\sigma_m}{2\pi f \epsilon_0} \quad (3)$$

여기서 ϵ_0 는 자유공간에 대한 유전율이다. ϵ_{ms} 는 $\omega=0$ 일 때의 정적 유전율(static permittivity)이며, $\epsilon_{m\infty}$ 는 $\omega=\infty$ 인 경우의 무한 유전율(infinite permittivity), τ_m 는 이완시간(relaxation time)을 나타낸다. 그리고 σ_m 는 $\omega=0$ 일 때의 정적 도전율(static conductivity)이다. 증류수의 경우에는 $\epsilon_{m\infty} = 5.188$, $\epsilon_{ms} = 78.197$, $\tau_m = 8.192 \times 10^{-12}$, $\sigma_m = 0$ 이다.

위의 식 (2)에서 $m=1,2$ 일 때는 각각 기준매질 1, 2(공기, 증류수)일 때의 상황을 나타낸다. 기준매질 2(증류수, $m=2$)일 때 식 (2)를 D 에 대해 정리하면 식 (4)와 같다.

$$D_i = \frac{1}{k_2} \tan^{-1} \left(\frac{(1 - \Gamma_2)/(1 + \Gamma_2) \sqrt{\epsilon_c} - Y_{i-1}}{j \sqrt{\epsilon_2}} \right) \quad (4)$$

여기서 k_2 는 기준매질 2의 복소 파수, ϵ_c 는 동축선 내부 절연체의 상대 유전율이다. 기준매질 1 (공기, $m=1$)일 때 식 (2)를 Y 에 대해 정리하면 다음의 식 (5)와 같다.

$$Y_i = \frac{1 - \Gamma_1}{1 + \Gamma_1} \sqrt{\epsilon_c} - j \sqrt{\epsilon_1} \tan(k_1 D_i) \quad (5)$$

여기서 k_1 기준매질 1의 복소 파수이다.

식 (4)와 (5)에서 보면 Y, D 는 비선형적인 관계이므로 반복법으로 해를 구한다. 먼저 초기치 D_0 를 임의로 정하고, 기준매질 1에 대한 (ϵ_1, Γ_1) 을 식 (5)에 대입하여 초기치 Y_0 를 구한다. Y_0 이후의 계산과정을 일반화하면 다음과 같다. Y_{i-1} 과 기준매질 2에 대한 (ϵ_2, Γ_2) 를 식 (4)에 대입하여 D_i 를 구한다. 그리고 D_i 와 기준매질 1에 대한 (ϵ_1, Γ_1) 을 식 (5)에 대입하여 Y_i 를 구한다. 식 (4)와 식 (5)에 의해 계산되는 D_i 와 Y_i 가 수렴할 때까지 위와 같은 계산을 반복한다^[10].

다음은 기준매질로부터 계산한 Y, D 에 의해 측정매질의 반사 계수 Γ_m 를 복소 유전율 ϵ_m 로 환산한다. Γ_m 과 Y_i, D_i 를 식 (6)에 대입하여 복소 유전율의 초기치 ϵ_0 를 구하였다.

$$\epsilon_0 = \frac{-jc}{\omega D_i} \left(\frac{1 - \Gamma_m}{1 + \Gamma_m} \sqrt{\epsilon_c} - Y_i \right) \quad (6)$$

여기서 c 는 광속이다. 계산된 복소 유전율 ϵ_k 를 다음 식에 대입해서 X_k 를 얻는다.

$$X_k = \frac{\omega D_i}{c} \sqrt{\epsilon_k} \quad (7)$$

식 (7)을 다음 식에 대입하여 복소 유전율 ϵ_{k+1} 을 구한다.

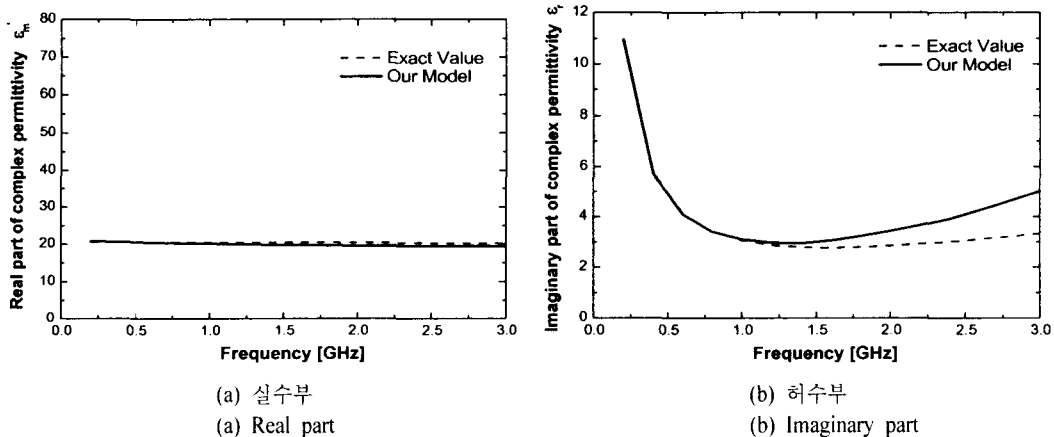


그림 3. 개방단말 동축선 프로브법으로 수치계산한 주파수에 따른 흙의 복소 유전율
Fig. 3. The complex permittivity of soil according to the frequency computed by an open-ended coaxial probe method.

$$\epsilon_{k+1} = \frac{-j\epsilon}{\omega D_i} \left(\frac{1-\Gamma_m}{1+\Gamma_m} \sqrt{\epsilon_c} - Y_i \right) X_k \cot(X_k) \quad (8)$$

식 (8)를 바로 전의 복소 유전율과 비교하여 $|(\epsilon_{k+1} - \epsilon_k)/\epsilon_k| \ll 1$ 의 수렴조건을 만족할 때까지 위의 과정을 반복한다.

수치계산에 사용된 개방단말 동축선 프로브는 $a = 1.4364 [mm]$, $b = 4.725 [mm]$, $\epsilon_c = 2.05$ 를 사용하였으며, 측정매질은 지하매질 중 수분함량이 높아서 유전율이 두 가지 기준매질의 중간 정도되는 흙을 선택하였다. 흙은 분산매질로서 Debye 분산식으로 표현하는데, 식 (3)에서 $\epsilon_{ms} = 20.5$, $\epsilon_{m\infty} = 4.0$, $\tau = 8.592ps$, $\sigma = 0.12^{[11]}$ 와 같다. 측정매질의 반사계수를 수치계산하여 개선된 가상의 전송선로 모델에 대입하여 주파수에 따른 복소 유전율을 환산하면 그림 3과 같다. 그림 3(a)의 복소 유전율의 실수부는 사용된 모든 주파수에서 오차가 4% 이하인데 반해, 그림 3(b)의 허수부는 주파수가 증가함에 따라 오차도 함께 증가하여 최고 3 GHz에서는 51%의 오차를 가졌다. 본 논문에서는 저주파수에 비해 큰 오차를 안고 있는 고주파에서의 복소 유전율 오차의 원인을 조사한다.

IV. Local Minimum을 확인하기 위한 유전자 알고리즘

반복법은 초기치 D_0 , Y_0 를 시작으로 식 (4)와 (5)를 교대로 계산하면서 수렴하는 최초의 값 Y 와 D 을 만날 때까지 계산하는 알고리즘이다. 그러므로 수렴치 Y 와 D 는 넓은(global) 영역에서 최적화된 해가 아닐 수도 있다. 본 논문에서는 넓은 영역에서의 최적화 알고리즘인 유전자 알고리즘을 사용하여 반복기법의 local minimum을 확인하고자 한다.

유전자 알고리즘^[14]은 유전적인 조합과 진화의 과정을 통해 넓은 영역에서 파라미터를 최적화하는 수치계산기법이다. 유전자(gene)는 유전자 알고리즘의 최소단위로써 본 논문에서는 최적화되는 i bit의 Y_m 와 j bit의 D_n 을 가리킨다. 그리고 유전자 Y_m 와 D_n 을 묶어서 염색체(chromosome)라고 한다.

유전자 알고리즘은 염색체의 선택(selection)과 조

합(mating) 그리고 변형(mutation)에 의해서 파라미터를 넓은 영역내에서 최적화하며, 이때 염색체의 변화를 위해서 조각이 수월한 2진수로 표현하게 되었다. 10진수의 염색체와 2진수 염색체간에는 다음과 같은 등간격 선택에 의한 1대 1 대응이 이루어진다.

$$interval = \frac{D_{max} - D_{min}}{2^j - 1} \quad (9)$$

여기서 D_{max} 와 D_{min} 는 문제영역에서 가상의 전송선로 길이(D)의 최대, 최소 길이이다. j 는 D_n 의 bit 수다.

문제영역에서 최적화 할 Y 와 D 의 후보값들을 각각 M , N 개 선택하였다. 추출된 유전자들의 배열에 의해 만들어진 총 ($M \times N$)개의 염색체를 population이라고 한다. 선택된 2진수의 염색체를 10진수로 변환해서 식 (10)에 대입하여 기준매질의 반사계수를 계산한다.

$$\Gamma_m(Y_m, D_n) = \frac{\sqrt{\epsilon_c} - Y - j\sqrt{\epsilon_m} \tan(k_n D)}{\sqrt{\epsilon_c} + Y + j\sqrt{\epsilon_m} \tan(k_n D)} \quad (10)$$

선택된 [Y_m, D_n]으로 계산된 반사계수 $\Gamma_1(Y_m, D_n)$, $\Gamma_2(Y_m, D_n)$ 와 FDTD 기법^[4]에 의해 계산한 반사계수 Γ_1 , Γ_2 를 식 (11)에 대입하여 목적함수(cost function)를 계산한다.

$$cost(Y_m, D_n) = \left\{ \begin{aligned} &Re \left| \frac{\Gamma_1 - \Gamma_1(Y_m, D_n)}{\Gamma_1} \right| + \\ &Im \left| \frac{\Gamma_1 - \Gamma_1(Y_m, D_n)}{\Gamma_1} \right| + \\ &Re \left| \frac{\Gamma_2 - \Gamma_2(Y_m, D_n)}{\Gamma_2} \right| + \\ &Im \left| \frac{\Gamma_2 - \Gamma_2(Y_m, D_n)}{\Gamma_2} \right| \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

그림 4의 좌측 그림과 같이 식 (11)에서 계산된 $cost(Y_m, D_n)$ 값에 따라 염색체의 순위를 매긴다. $cost(Y_m, D_n)$ 을 가장 작게 만든 염색체가 1위이다. 그 다음으로 작은 목적함수 값을 갖는 염색체가 2위이다. 이렇게 정렬된 염색체들 중에 상위 일정비율만 선택되고 나머지는 버려진다. 그림 4의 오른쪽 위쪽 그림과 같이 선택된 염색체를 부모(parent) 염

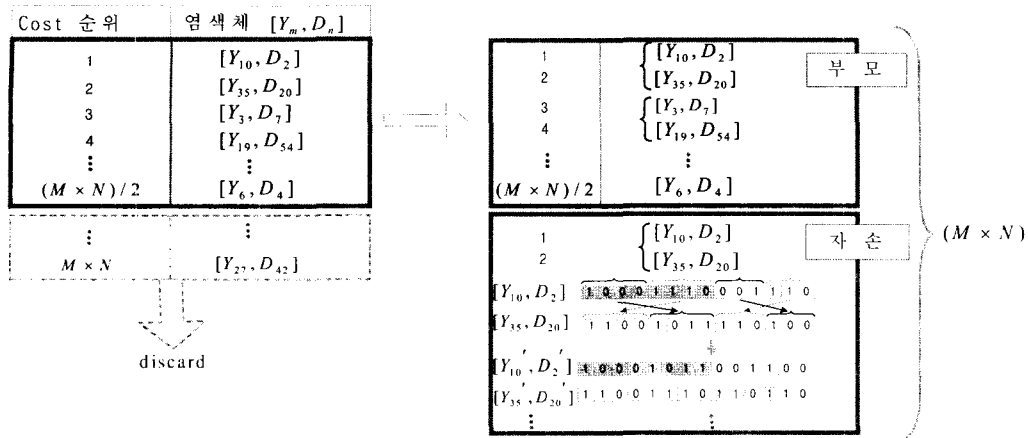


그림 4. 유전자 알고리즘에서의 자손 생성
Fig. 4. The creation of off-springs in the genetic algorithm.

색체라고 한다. 부모 염색체간의 교차조합에 의해 낳은꼴의 자손(offspring) 염색체를 만드는데, 그림 4의 우측 하단 그림과 같다. 이렇게 해서 최적화 조건에 보다 근접한 염색체들만을 추려내고 조합하여 보다 빨리 파라미터를 최적화할 수 있게 된다.

이렇게 만들어진 (M×N)개의 염색체들 중에서 임의의 염색체를 선택하여 임의의 한 bit를 “1”이면 “0”으로, “0”이면 “1”로 변환시켜서 돌연변이(mutation)를 만든다. 이와 같은 돌연변이의 변환 bit에 의해서 현재의 문제 영역뿐만 아니라 새로운 영역에서의 염색체를 최적화할 수 있다. 돌연변이 염색체가 만들어지면 이제 (M×N)개의 염색체로 구성된 새로운 population이 생성된다. 새로운 (M×N)개의 염색체는 10진수로 변환되어 다시 식 (11)의 목적함수에 대입한다. 식 (11)의 각각의 항이 모두 한계값(tolerance) 이하가 될 때 위의 계산을 종료한다.

V. 환산모델의 모델링 한계 확인 방법

가상의 전송선로 모델의 변수인 Y와 D는 측정 매질에 접촉된 프로브를 등가화하였다. 만약 Y와 D가 최적화되었다면 어떤 주파수에서든 최소오차로 반사계수를 복소 유전율로 환산할 것이다. 본 절에서는 이제까지 기준매질로부터 구해왔던 Y와 D의 계산과정 대신 복소 유전율의 오차를 최소화하는 Y_{ex}와 D_{ex}를 문제영역에서 추출하였다. 그

리고 이렇게 추출된 등가화 변수를 기준에 기준매질에 의해 계산된 Y, D와 비교하였다. 그리고 각각의 등가 변수를 이용하여 환산한 복소 유전율의 상대오차도 비교하였다. 이러한 방법은 실제 측정 시 Y, D를 계산하기 위해 사용될 수 있는 방법이 아니며, 환산모델의 한계를 확인하기 위해 사용되었다.

Y와 D를 기준매질을 이용하여 계산하지 않고, 그림 5과 같이 문제 영역에서 후보값을 등간격으로 추출하였다. k 번째 원소인 [Y_{ex}, D_{ex}]_k를 이용하여 측정매질의 반사계수 Γ_m로부터 복소 유전율 ε_{m(k)}을 환산한다. 환산값 ε_{m(k)}과 기준값 ε_m의 상대오차를 구하여 복소 유전율의 실수부 오차 ε_{m(k)(error)}와 허수부 오차 ε_{m(k)(error)}를 계산한다. 이러한 과정을 반복하면서 복소 유전율 오차를 가장 작게 하는 Y_{ex}와 D_{ex}를 찾는다.

개선된 가상의 전송선로 모델의 경우에는 프로브의 단말면에서의 반사계수 Γ_m는 측정매질의 복소 유전율, Y, D로 나타낼 수 있다. 즉 Γ_m=f(ε_m, Y, D)의 함수관계식이 성립한다. 따라서 Y, D를 알고 있으면 매질의 반사계수를 복소 유전율로 환산할 수 있었다. 그리고 매질의 복소 유전율로부터 반사계수를 계산할 수도 있다. 위에서 측정매질의 복소 유전율 오차를 최소화하는 Y_{ex}와 D_{ex}를 추출하였다. 이 등가 변수에 의해서도 Γ_m=f(ε_m,

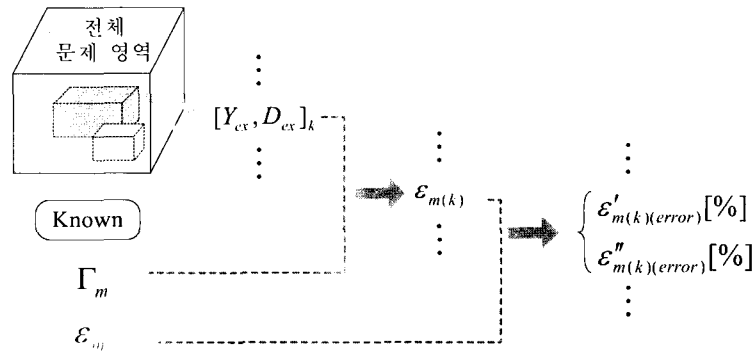


그림 5. 복소 유전율 오차 최소값이게 하는 변수 추출 과정

Fig. 5. The process of calculating the complex permittivity of soil by the parameter extraction method.

Y_{ex}, D_{ex} 이 성립해야 한다. 따라서 본 논문에서는 $m=1,2$ (기준매질 공기, 증류수)에 대해서 반사 계수를 구하고자 한다.

VI. 수치계산 결과

반복법과 유전자 알고리즘으로 계산한 $Y(= Y_r + j Y_i)$, D 와 복소 유전율의 오차를 각각 주파수 1 GHz, 1.4 GHz, 3 GHz에 대해 구하면 표 1, 2, 3과 같다.

표 1을 보면 1 GHz에서 두 가지 방법에 의해 계산한 Y 와 D 는 거의 같다. 따라서 반복법으로 구

한 Y 와 D 는 local minimum이 아니라 global minimum임을 알 수 있었다. 1 GHz에서 환산한 복소 유전율은 3 % 이하의 오차를 가진다. 표 2는 주파수가 1.4 GHz 일 때의 두 가지 방법으로 계산된 파라미터와 복소 유전율 오차로서 이때에도 Y 와 D 가 거의 같다. 따라서 1.4 GHz에서도 Y 와 D 는 최적화되었다. 그런데 주파수가 1 GHz에서 1.4 GHz로 올라가면서 흙의 복소 유전율 오차가 3~6 %로 증가하는 것을 볼 수 있다. 주파수가 3 GHz일 때의 수치계산 결과는 표 3에서 나타내었다. 3 GHz에서 두 방법으로 계산된 Y 와 D 값의 차이가 컸다. 이것은 유전자 알고리즘에서 계산을 종료하는 최적화 조건

표 1. 반복법과 유전자 알고리즘으로 계산한 Y 와 D ($f=1 \text{ GHz}$, $\lambda_{water}=\lambda=3.333 \times 10^{-2}$)

Table 1. The Y and D calculated by a iteration method and genetic algorithm($f=1 \text{ GHz}$, $\lambda_{water}=3.333 \times 10^{-2}$).

| | Y | | D | $\epsilon'_{m(error)}[\%]$ | $\epsilon''_{m(error)}[\%]$ |
|----------|------------------------|------------------------|------------------|----------------------------|-----------------------------|
| | Real | Imaginary | | | |
| 반복법 | 3.223×10^{-6} | 2.145×10^{-3} | $\lambda 24.171$ | 1.987 | 1.567 |
| 유전자 알고리즘 | 3.159×10^{-6} | 2.493×10^{-3} | $\lambda 24.425$ | 1.009 | 2.648 |

표 2. 반복법과 유전자 알고리즘으로 계산한 Y 와 D ($f=1.4 \text{ GHz}$, $\lambda_{water}=\lambda=2.381 \times 10^{-2}$)

Table 2. The Y and D calculated by a iteration method and genetic algorithm($f=1.4 \text{ GHz}$, $\lambda_{water}=2.381 \times 10^{-2}$).

| | Y | | D | $\epsilon'_{m(error)}[\%]$ | $\epsilon''_{m(error)}[\%]$ |
|----------|------------------------|------------------------|------------------|----------------------------|-----------------------------|
| | Real | Imaginary | | | |
| 반복법 | 3.490×10^{-4} | 1.733×10^{-3} | $\lambda 16.839$ | 3.339 | 5.435 |
| 유전자 알고리즘 | 3.480×10^{-4} | 1.722×10^{-3} | $\lambda 16.828$ | 3.401 | 5.367 |

표 3. 반복법과 유전자 알고리즘으로 계산한 Y 와 D ($f=3\text{ GHz}$, $\lambda_{water}=\lambda=1.048\times 10^{-2}$)

Table 3. The Y and D calculated by a iteration method and genetic algorithm($f=3\text{ GHz}$, $\lambda_{water}=1.048\times 10^{-2}$).

| | Y | | D | $\epsilon'_{m(\text{error})}[\%]$ | $\epsilon''_{m(\text{error})}[\%]$ |
|----------|-----------------------|-----------------------|------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| | Real | Imaginary | | | |
| 반복법 | 2.513×10^{-4} | 2.470×10^{-3} | $\lambda/76.213$ | 3.804 | 50.119 |
| 유전자 알고리즘 | 3.159×10^{-6} | 2.493×10^{-3} | $\lambda/24.425$ | 14.774 | 31.911 |

에서 tolerance를 유사한 값으로 주었기 때문이다. 본 논문에서 수치계산한 프로브의 경우, 주파수가 3 GHz에서는 개선된 가상의 전송선로 모델로 구한 복소 유전율의 오차를 10% 이하로 떨어뜨리기 어렵다.

표 1, 2와 3으로부터 개선된 가상의 전송선로 모델의 Y 와 D 를 아무리 최적화시켜도 주파수가 높아짐에 따라 증가하는 복소 유전율의 오차를 줄일 수 없음을 확인할 수 있었다. 즉 등가 변수의 local minimum은 복소 유전율의 고주파 오차의 원인이 아니다. 복소 유전율 오차를 최소화 되게 하는 변수를 그림 5의 과정에서 추출하여 $[Y_{ex}, D_{ex}]$ 이라 하고, 반복법으로 계산한 등가화 변수를 (Y, D)이라 한다. 표 4를 보면 반복법의 결과와는 달리 복소 유전율의 오차를 1~1.6% 이하가 되게 하는 $Y_{ex}=0.2187+j0.2187$ 와 $D_{ex}=\lambda/8.547$ 를 그림 5의 과정으로 추출할 수 있었다.

이번에는 표 4의 $[Y_{ex}, D_{ex}]$ 를 개선된 가상의 전송선로 모델의 함수 관계식에 성립하는지를 확인하기 위해 $\Gamma_m=f(\epsilon_m, Y_{ex}, D_{ex})$ 에 대입하여 기준매질의 반사계수를 계산한다. 표 5는 $\Gamma_1=f(\epsilon_1, Y_{ex}, D_{ex})$, $\Gamma_2=f(\epsilon_2, Y_{ex}, D_{ex})$ 를 계산하여 FDTD 기법으로 수치계산된 반사계수와 비교하였다. 추출된 Y_{ex} 와 D_{ex} 에 의한 기준매질의 반사계수는 수치계산된 반사계수와 큰 차이를 보였다. 마치 공기와 증류수가 아닌 다른 매질에 의해 계산된 등가화 변수처럼 보인다. 이와 같은 상황을 종합해서 정리해 보면 다음과 같다. 주파수가 낮았을 때에는 공기와 증류수에 의해 계산한 등가화 변수 Y, D 가 흠의 반사계수를 복소 유전율로 비교적 정확하게 환산하여 $\Gamma_m=f(\epsilon_m, Y, D)$ 의 관계식이 성립한다. 그러나 주파수가 올라가면 공기와 증류수를 써서 구한 Y, D 에 오차가 커져서 $\Gamma_m\neq f(\epsilon_m,$

표 4. 반복법과 변수 추출법으로 계산한 Y 와 D ($f=3\text{ GHz}$, $\lambda_{water}=\lambda=1.048\times 10^{-2}$)

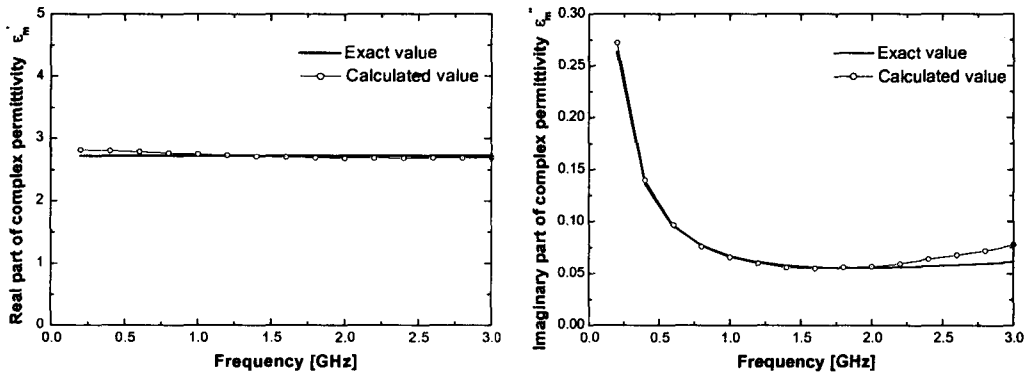
Table 4. The Y and D calculated by a iteration method and parameter abstract method($f=3\text{ GHz}$, $\lambda_{water}=1.048\times 10^{-2}$).

| | Y | | D | $\epsilon'_{m(\text{error})}[\%]$ | $\epsilon''_{m(\text{error})}[\%]$ |
|-------|-----------------------|-----------------------|------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| | Real | Imaginary | | | |
| 반복법 | 2.513×10^{-4} | 2.470×10^{-3} | $\lambda/76.213$ | 3.804 | 50.119 |
| 변수 추출 | 2.187×10^{-1} | 2.187×10^{-1} | $\lambda/8.547$ | 1.198 | 1.522 |

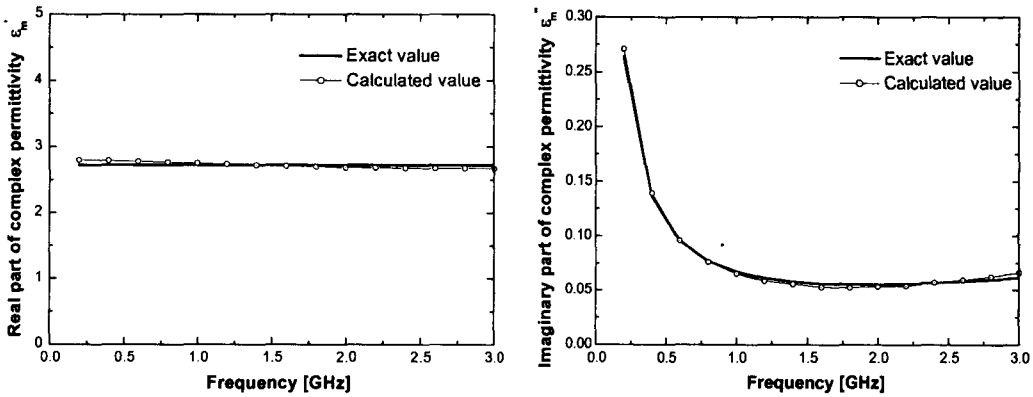
표 5. 추출한 등가화 변수에 의한 기준매질의 반사계수 ($f=3\text{ GHz}$, $\lambda_{water}=\lambda=1.048\times 10^{-2}$)

Table 5. The reflection coefficients of reference materials calculated by a abstracted parameters($f=3\text{ GHz}$, $\lambda_{water}=1.048\times 10^{-2}$).

| | Reference (FDTD 수치계산기법) | 계산값 (변수 추출) | 반사계수의 상대오차[%] | |
|------------|-------------------------|-------------------|---------------|-----------|
| | | | Real | Imaginary |
| Γ_1 | $0.9910-j0.1312$ | $0.6793-j0.3059$ | 31.458 | 133.158 |
| Γ_2 | $-0.7990-j0.2343$ | $-0.8767-j0.3211$ | 9.721 | 37.031 |



(a) 모래의 복소 유전율($a = 1.4364 [mm]$, $b = 4.725 [mm]$, $\epsilon_c = 2.05$ 인 프로브)
 (a) The complex permittivity of sand(probe size: $a = 1.4364 [mm]$, $b = 4.725 [mm]$, $\epsilon_c = 2.05$).



(b) 모래의 복소 유전율($a = 1.1305 [mm]$, $b = 3.7085 [mm]$, $\epsilon_c = 2.03$ 인 프로브)
 (b) The complex permittivity of sand(probe size: $a = 1.1305 [mm]$, $b = 3.7085 [mm]$, $\epsilon_c = 2.03$).

그림 6. 다른 굵기의 프로브에 대해 수치계산된 모래의 복소 유전율
 Fig. 6. The complex permittivity of sand calculated for the different probe size.

Y, D)이 된다. 이와 같은 한계는 주파수 올라가면 측정매질 쪽으로 복사되는 전자파가 많아지므로 TEM 모드를 기반으로 한 가상의 전송선로 모델로 이 된다. 이와 같은 한계는 주파수 올라가면 측정매질 쪽으로 복사되는 전자파가 많아지므로 TEM 모드를 기반으로 한 가상의 전송선로 모델로는 등가화 시킬 수 없기 때문으로 보인다.

개선된 가상의 전송선로 모델의 고주파에서의 오차를 극복하기 위한 방법은 다음과 같다.

1) $\Gamma_m = f(\epsilon_m, Y, D, \omega)$ 과 같이 주파수가 따른 영향을 고려하여 고주파에서의 전자파의 복사될 등가화 하는 새로운 환산모델을 개발한다.

2) 간단히 동축선의 차단 주파수^[15]를 올려서 사

용하는 방법이 있다. 그림 6은 굵기가 서로 다른 프로브에 대해 수치계산한 다른 모래의 복소 유전율 ($\epsilon_{ms} = 2.72$, $\epsilon_{m\infty} = 0.846$, $\tau = 1.24ps$, $\sigma = 0.0029$)이다. 그림 6(b)의 프로브는 본 실험실에서 설계한 프로브로써 그림 6(a)의 경우보다 차단 주파수가 높아서 오차가 현저히 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 프로브의 굵기를 얇게 하면 고주파 오차는 줄어들지만, 측정매질과의 접촉오차 등은 증가하므로 실제 측정상황을 고려하여 동축선의 굵기와 내부 절연체의 유전율을 결정해야 한다.

VI. 결 론

본 논문에서는 개방단말 동축선 프로브의 반사계

수를 복소 유전율로 환산하기 위하여 제시되었던 개선된 가상의 전송선로 모델의 고주파 오차 원인을 조사하였다. 먼저 개선된 가상의 전송선로 모델에서의 등가화 변수를 구하기 하기 위해 사용된 반복기법이 local minimum일 수 있기 때문에 넓은 영역에서 최적화하는 기법인 유전자 알고리즘에 의한 수치 계산값과 비교하였다. 수치계산 결과에 의하면 개선된 가상의 전송선로 모델에서 고주파에 대한 오차는 등가화 변수가 최적화되어도 계속 증가하였다. 그러므로 등가 모델 변수의 local minimum은 고주파에서의 오차 원인이 아니다. 그 다음으로는 개선된 가상의 전송선로 모델의 모델링 여부를 확인하였다. 3 GHz에서 복소 유전율 오차를 1.6 % 이하이도록 하는 등가 변수를 추출하였다. 그리고 등가 변수에 의해 문제 상황(측정매질과 이에 접촉된 프로브)의 모델링 여부를 판별하기 위해서 추출된 등가 변수를 사용하여 기준매질의 복소 유전율로부터 반사계수를 계산하여 보았다. 그러나 계산된 기준매질의 반사계수는 오차가 최고 134 % 였다. 그러므로 추출된 등가 변수는 문제 상황을 모델링한 것이 아님을 알 수 있다. 주파수가 올라갈수록 개선된 가상의 전송선로 모델은 개방단말 동축선 프로브를 등가오차가 커진다. 이것은 TEM 모드의 전송선로 이론으로 등가화한 개선된 가상의 전송선로 모델이 주파수가 증가하면 측정매질 쪽으로 복사되는 전자파가 발생하는 현상을 무시했기 때문이다. 따라서 개선된 가상의 전송선로 모델로 본 논문의 흡의 복소 유전율을 환산할 경우 1.6 GHz 이하에서는 10 % 이하의 오차를 보장한다. 고주파에서의 복사되는 전자파의 영향을 고려한 개방단말 동축선 프로브의 환산모델은 본 논문을 토대로 하여 추후에 제안하겠다.

참 고 문 헌

[1] A. V. Hippel, *Dielectric Materials and Applications*, Artech House, Boston, 1954.
 [2] H. E. Bussey, "Measurement of RF properties of materials-a survey", *Proc. IEEE*, vol. 55, no. 6, pp. 1046-1053, 1967.
 [3] D. J. Daniels, *Surface-Penetrating Radar*, IEE,

London, 1996.

[4] 현승엽, 김세윤, 김영식, "지하침투 레이더의 FDTD 모의계산 결과와 측정자료의 비교", 대한전자공학회 논문지, 36-D(7), pp. 581-588, 1999.
 [5] A. Taflove, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, Artech House, Boston, 1995.
 [6] A. M. Nicolson, G. F. Loss, "Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-19, no. 11, pp. 377-382, 1970.
 [7] E. Tanabe, W. T. Joines, "A nondestructive method for measuring the complex permittivity of dielectric materials at microwave frequencies using an open transmission line resonator", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-25, no. 3, pp. 222-226, 1976.
 [8] E. C. Burdette, F. L. Cain and J. Seals, "In vivo probe measurement technique for determining dielectric properties at VHF through microwave frequencies", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-28, no. 4, pp. 414-427, 1980.
 [9] F. M. Ghannouchi, R. G. Bosisio, "Measurement of microwave permittivity using a six-port reflectometer with an open-ended coaxial line", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-38, no. 2, pp. 505-508, 1989.
 [10] 신현, 현승엽, 김상욱, 김세윤, "복소유전율 측정용 개방단말 동축선 프로브의 새로운 등가모델", 1999년도 추계마이크로파 및 전파 학술대회 논문집, 22(2), pp. 143-146, 1999.
 [11] S. Bringham, M. F. Iskander and M. J. White, "Thin-sample measurements and error analysis of high-temperature coaxial dielectric probes", *IEEE Trans. Microwave Theory. Tech.*, vol. MTT-45, no. 12, pp. 2073-2083, 1997.
 [12] J. M. Bourgeois, 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, 1996.

[13] D. Misra, "On the measurement of the complex permittivity of materials by an open-ended coaxial probe", *IEEE Microwave and Guided Wave Lett.*, vol. MGWL-5, no. 5, pp. 161-163, 1995.

[14] R. L. Haupt, "An introduction to genetic algorithms for electromagnetics", *IEEE Antennas Propagat. Mag.*, vol. 37, no. 2, pp. 7-15, 1995.

[15] N. Marcuvitz, *Waveguide Handbook*, Dover: New York, 1965.

조 유 선

1999년 2월: 제주대학교 통신공학과 (공학사)
 2002년 8월: 고려대학교 전파공학과 (공학석사)
 2002년 9월 ~ 현재: KIST 영상미디어 연구센터 위축연구
 원
 [주 관심분야] 복소 유전율 측정기법, 수치해석, 전자파
 Imaging

김 영 식



1973년 2월: 고려대학교 전자공학
 과 (공학사)
 1977년 8월: 고려대학교 전자공학
 과 (공학석사)
 1986년 5월: University of Mas-
 sachusetts at Amherst (공학석사)
 1988년 5월: University of Massa-
 chusetts at Amherst (공학박사)

1993년 3월 ~ 현재: 고려대학교 전파공학과 교수
 [주 관심분야] 밀리미터파 안테나, front-end 시스템, 이동
 통신시스템

김 세 윤



1978년 2월: 서울대학교 전기공학
 과 (공학사)
 1980년 2월: KAIST 전기 및 전자
 공학과 (공학석사)
 1984년 8월: KAIST 전기 및 전자
 공학과 (공학박사)
 1986년 11월: KAIST 전기 및 전

자공학과 (Post-doctor)
 1986년 12월 ~ 현재: KIST 영상미디어 연구센터 책임연
 구원
 [주 관심분야] 파동의 회절 및 복사, 전자파 Imaging, 안테
 나 설계, EMI/EMC