개방단말 동축선 프로브의 개선된 환산모델에 대한 FDTD 검증

FDTD Verification of an Improved Conversion Model for an Open-Ended Coaxial Probe

조 유 선 · 현 승 엽 · 김 세 윤*

Yu-Sun Jo · Seung-Yeup Hyun · Se-Yun Kim*

요 약

개방단말 동축선 프로브를 사용하여 0.2~2.0 GHz에서 측정된 메탄올의 복소 유전율을 문헌에 주어진 값과 비교해 본 결과 많은 차이를 보였다. 본 논문에서는 실험에 사용된 메탄올 용액의 복소 유전율이 측정치와 주어진 값 중에 어디에 더 가까운지를 조사하였다. 무시할만큼 작은 측정오차에 대한 영향은 배제하고, 환산 모델 오차만의 영향을 확인하기 위해서 FDTD 기법을 도입하였다. FDTD 수치 계산된 반사계수를 우리의 환산모델에 의해 복소 유전율로 환산한 값이 주어진 값이 아닌 측정값에 더욱 근접함을 보임으로서 우리가 사용한 측정-환산 과정의 정확도와 안정도를 확인하였다.

Abstract

The complex permittivities of methanol measured from 0.2 to 2.0 GHz using an open-ended coaxial probe revealed the large deviation from the given data in literature. In this paper, it was investigated whether the given or measured complex permittivity is similar to the real value of our methanol used for experiment. The FDTD method was applied to confirm the effect of our conversion model excluding the effect of sufficiently small measurement error. The complex permittivities reconverted from the computed reflection coefficient by employing our improved conversion model were not similar to the given value but measured value. These results assured the accuracy and stability of our measurement-and-conversion process.

Key words : Complex Permittivity, Improved Conversion Model, FDTD

Ⅰ. 서 론

본 연구실에서는 지하 탐사 레이더(GPR: ground-penetrating radar)[1] 시스템을 이용하여 매설된 상수도관의 누수를 탐지할 수 있는 기술을 개발하고 있다[2]. GPR 시스템을 최적 설계할 수 있는 프로그램을 FDTD(finite-difference time-domain)[3] 기법을 써서 개발하였는데, 이에 대한 타당성을 확인하기 위하여 실험실내에 scale-down된 GPR 시스템 및 측정환경을 구축하였다. 이때 상수도관이 묻힌 배경매질을 마른 모래로 하였는데, 관에서 누수된 물이 모래를 통해 바닥으로 흘러내리고 젖은 부위가 비균일하여서 정확한 GPR 측정이 곤란하였다. 그래서 다루기 쉬운 매질 중에 젖은 모래와 복소 유전율이 유사하면서 균일한 전기적인 특성을 가진 메탄올을 대신 사용하게 되었다[4].

고려대학교 전파공학과(Dept. of Radio Sciences and Eng., Korea Univ.)
*한국과학기술연구원 영상미디어연구센터(Imaging Media Research Center, KIST)
· 논 문 번 호 : 20040305-025
· 수정완료일자 : 2004년 4월 30일

FDTD 수치계산에 필요한 배경매질, 표적, 공기 등과 같은 매질의 복소 유전율을 측정하기 위해 개방단말 동축선 프로브를 자체 설계하였었다. 시료매장에서 메탄올을 구입하여 프로브의 개구면을 담구고 회로망 분석기(vector network analyzer: HP8714C)를 사용하여 0.2~2.0 GHz에서 반사계수를 측정하였다. 개선된 환산 알고리즘은 측정된 반사계수를 각각의 주파수마다 복소 유전율로 환산시킨다. 그런데 측정된 메탄올의 복소 유전율이 문헌[5]에 주어진 값과의 차이가 컸다. 먼저 프로브로 측정된 복소 유전율에 예상되는 오차 원인으로는 계측기 불확실성(uncertainty), 프로브와 측정매질간의 불완전 접촉, 환산 모델의 부정확성[6] 등이 있다. 그렇지만 여러 측정환경에 의한 복소 유전율의 민감도를 감안할 때, 문헌에 주어진 값[5]이 실험에 쓰인 메탄올의 복소 유전율이라고 단정하기도 어렵다. 따라서 본 논문에서는 개방단말 동축선 프로브 단말면에서의 반사계수를 정확히 모의 계산하는 FDTD 기법을 적용하여 측정값과 주어진 값 중에 어느 값이 구입한 메탄올의 복소 유전율에 가까운지를 확인하였다.

앞서 측정된 복소 유전율 값을 Debye 식으로 fitting하여 개방단말 동축선 프로브에 대한 FDTD 프로그램에 입력하면 측정매질의 반사계수를 구할 수 있다. 그리고 주어진 값에 대한 반사계수도 계산하였다. 전자가 측정된 반사계수에 좀더 근접함을 확인하였다. 그리고 측정된 복소 유전율을 fitting하여 FDTD 기법으로 계산한 반사계수를 우리의 환산모델에 대입하여 재환산 복소 유전율은 기존의 문헌에서 주어진 메탄올의 복소 유전율보다는 오히려 처음 측정과 환산을 통해 구했던 복소 유전율에 더 근접함을 볼 수 있었다. 이러한 결과로부터 우리가 사용한 개선된 가상의 전송선 환산모델이 매우 정확함을 확인할 수 있었다.

Ⅱ. 개선된 가상의 전송선로 모델과 측정 결과

개방단말 동축선 프로브는 그림 1에서 보인 바와 같이 내심의 반지름 길이 a=1.1305 *mm*, 외심의 반지름의 길이 b=3.7085 *mm*, 동축선 내부 절연체의 상대 유전율 ε_c=2.03, 접지판의 반지름 r=2 *cm*이다. 프로브의 구조는 사용된 동축선의 내·외심 반지름

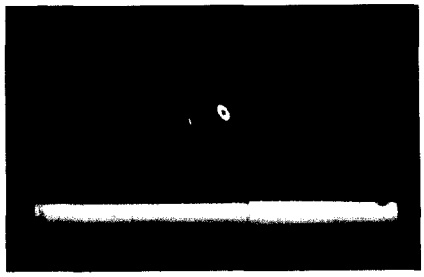


그림 1. 개방단말 동축선 프로브의 구조
Fig. 1. Geometry of open-ended coaxial probe.

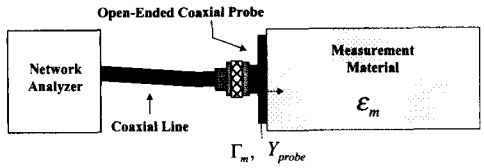
길이, 절연체의 유전율과 최대한 동일하게 제작되었다.

개방단말 동축선 프로브를 사용하여 임의 매질의 복소 유전율을 측정하는 과정은 다음과 같이 2단계로 구성된다. 먼저 측정매질을 개방단말 동축선 프로브의 도체판에 접촉시키고 프로브의 다른 한쪽은 동축선을 통하여 회로망 분석기에 연결된다. 반사계수 측정 기준면을 프로브 개구면으로 하기 위한 교정은 개구면에서의 물의 반사계수를 수치계산하여 프로브 길이를 보상하게 된다[7]. 다음은 회로망 분석기로 각 주파수마다 프로브 단말면에서 측정된 반사계수 $\Gamma(f)$는 PC에 설치된 환산 알고리즘[6]에 의하여 복소 유전율 $\varepsilon_r(f)$로 환산된다.

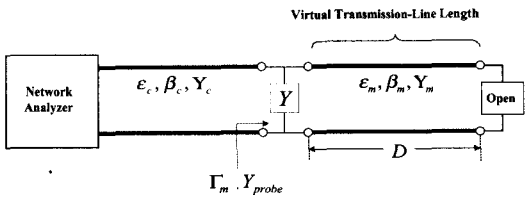
프로브 단말면과 측정매질의 접촉면에서의 반사계수와 측정매질의 복소 유전율간의 환산식은 가상의 전송선로 모델[8]을 개선한 그림 2의 등가모델[6]에 의해 제시된다. 그림 2(a)에서 동축선 단말면의 불연속면을 그림 2(b)의 어드미턴스 Y 로 등가화 하였다. 그리고 복소 유전율이 ε_m인 측정매질은 그림 2(b)와 같이 끝이 개방되고 길이가 D 인 가상의 전송선로로 등가화 하였다. 그러면 그림 2(a)의 개방단말 동축선 프로브의 단말 경계면에서의 입력 어드미턴스 Y_{probe}는 그림 2(b)의 Y_{probe}와 등가이며 전송선로 이론에 의해 다음과 같이 유도한다.

$$Y_{probe} = \frac{1-\Gamma_m}{1+\Gamma_m} Y_c = \frac{Y}{60\ln(b/a)} + jY_m \tan(\beta_m D) \quad (1)$$

여기서 Γ_m은 프로브 단말면에서의 측정매질의 반사계수이다. 그리고 $Y_c\left(=\frac{\sqrt{\varepsilon_c}}{60\ln(b/a)}\right)$와 $Y_m\left(=\frac{\sqrt{\varepsilon_m}}{60\ln(b/a)}\right)$



(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. $\beta_m(=\omega\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}\sqrt{\varepsilon_m})$은 가상의 전송선로의 파수(wavenumber)다. 식 (1)에서 Y와 D는 각각 다음과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$Y = \frac{1-\Gamma_m}{1+\Gamma_m}\sqrt{\varepsilon_c} - j\sqrt{\varepsilon_m}\tan(\beta_m D) \quad (2)$$

$$D = \frac{1}{\beta_m}\tan^{-1}\left(\frac{(1-\Gamma_m)/(1+\Gamma_m)\sqrt{\varepsilon_c}-Y}{j\sqrt{\varepsilon_m}}\right) \quad (3)$$

개선된 가상의 전송선로 모델의 경우에는 프로브의 단말면에서의 반사계수 Γ_m가 측정매질의 복소 유전율 ε_m, Y, D에 따라 달라지므로, $\Gamma_m = f(\varepsilon_m, Y, D)$의 관계식으로 표현할 수 있다. 이미 복소 유전율을 알고 있는 2가지의 기준매질의 반사계수를 측정한 후, 이를 식 (2)와 (3)에 대입하여 반복 계산함으로서 Y와 D를 구한다. 다음에는 미지의 복소 유전율 ε_m을 갖는 매질을 프로브 단말에 접촉시킨 후 반사계수 Γ_m을 측정한 후, 이를 식 (4)와 (5)의 대입, 반복 계산하면 복소 유전율 ε_m을 구할 수 있다[6].

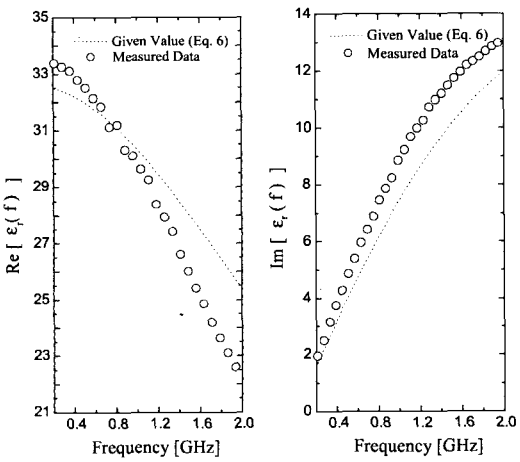
$$X = \frac{\omega D}{c}\sqrt{\varepsilon_m} \quad (4)$$

$$\varepsilon_m = \frac{-jc}{\omega D}\left(\frac{1-\Gamma_m}{1+\Gamma_m}\sqrt{\varepsilon_c} - Y\right) X\cot(X) \quad (5)$$

위의 환산모델에 의해 측정된 메탄올의 반사계수를 복소 유전율로 환산한다. 기준매질은 주위에서 쉽게 구할 수 있는 증류수(의료용)와 공기로 하였다. 메탄올의 반사계수를 상온, 0.2~2.0 GHz에서 측정하여 위의 환산모델에 대입하면 주파수마다 실시간에 복소 유전율로 환산하면 그림 3과 같다. 측정결과를 검증하기 위해 식 (6)과 같은 Debye 식으로 표현된 메탄올[5]과 비교하였다.

$$\varepsilon_m(f) = \varepsilon_{m\infty} + \frac{\varepsilon_{ms}-\varepsilon_{m\infty}}{1+j2\pi f\tau_m} = 5.6 + \frac{32.6-5.6}{1+j2\pi f(48\times10^{-12})} \quad (6)$$

그런데 그림 3(a)와 (b)에서 측정된 실수부와 허수부는 주어진 값에 대해 각각 최대 12.81 %와 20 %의 차이가 발생했다. 전체 측정과정에서 발생할 수 있는 오차는 계측기의 측정오차, 프로브와 측정매질간의 불완전 접촉과 환산모델의 부정확성 등이 있을 수 있다. 또한 매질의 복소 유전율은 여러 측정환경에 따라 달라질 수 있으므로, 우리가 측정에 사용한 메탄올이 식 (6)으로 표현되는 복소 유전율을 갖는 메탄올과 동일하다고 확언할 수 없다.



(a) 실수부
(a) Real part

(b) 허수부
(b) Imaginary part

그림 3. 측정된 메탄올의 복소 유전율(상온)
Fig. 3. The measured complex permittivities of methanol (room temperature).

본 논문에서는 측정치와 주어진 값 중에 어느 값이 구입했던 메탄올의 복소 유전율에 가까운지 알고자 한다. 먼저 개방단말 동축선 프로브를 이용하여 매질의 복소 유전율을 측정하는 과정에 대한 검증 작업을 수행한다. 매질의 반사계수를 측정할 경우 매질이 액체인 경우에는 프로브와의 접촉오차는 무시할 만큼 작다[9]. 그리고 메탄올의 반사계수 측정시의 계측기의 uncertainty도 1 % 이내로 매우 정확하다. 그러므로 프로브와의 접촉면에서 측정된 메탄올의 반사계수에 포함된 측정오차는 미비하다. 다음은 환산 모델의 오차인데, 문헌에 주어진 값 이외에 복소 유전율(○)의 정확도에 대해 신뢰할만한 검증 자료를 확보하기 위해서 측정오차를 배제시킬 수 있는 FDTD 모의계산[6]을 이용하였다.

Ⅲ. FDTD 수치계산에 의한 검증

분산 FDTD 기법[6]을 적용함으로써 계측기 오차와 프로브의 접촉 오차의 영향에서 벗어나서, 단말면에 접촉한 임의 분산 매질의 반사계수를 계산할 수 있다. 그림 4는 FDTD 수치계산을 위한 개방단말 동축선 프로브의 단면도이다. 복소 유전율이 ε_m인 임의의 균일한 측정매질에 프로브가 접촉되어 있다. 동축선 끝단은 반지름 R인 원형 도체 평판으로 종단되어 있다. 프로브는 z 축으로 대칭이기 때문에, 반사계수를 구하기 위한 FDTD 모의계산은 그림 4와 같이 ϕ가 일정한 임의의 한 면에 대해서만 수행한다. 정확하고 안정된 모의 계산을 수행하기 위해서 cell 크기는 $\Delta\rho = \Delta z = 0.2261\ mm$으로 시간 간격은 $\Delta t = 0.32\ ps$으로 하였다. 동축선의 길이를 길게 하여 TEM 모드에서의 입사전압과 반사전압을 각각 분리함으로서, 주파수 영역에서의 반사계수의 크기 $|\Gamma_m|$와 위상 ϕ_{Γ_m}을 구하였다.

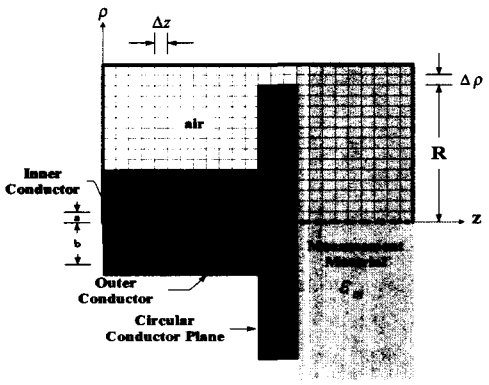


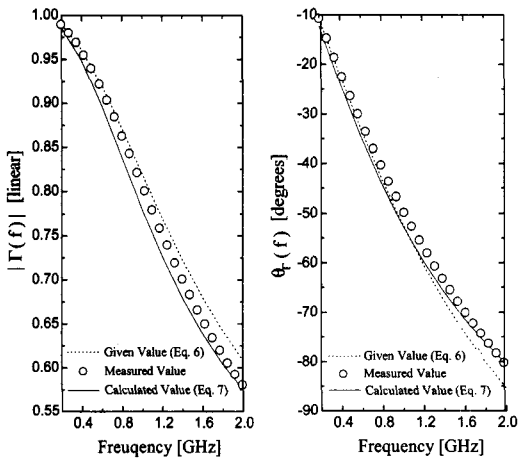
그림 4. 개방단말 동축선 프로브의 FDTD 계산영역
Fig. 4. FDTD calculation region of an open-ended coaxial probe.

그림 3에서 측정된 메탄올의 복소 유전율에 대한 반사계수를 FDTD 수치계산으로 계산하기 위하여 주파수에 따른 복소 유전율을 Debye 모델로 fitting하였으며, 각각의 parameter는 식 (7)과 같다.

$$\varepsilon_{ms} = 34,\quad \varepsilon_{m\infty} = 9,\quad \tau_m = 71\ [\text{ps}] \qquad (7)$$

측정치를 식 (7)의 Debye 모델로 표현할 때 약 5 %의 fitting 오차를 보유하였다. 식 (7)로 표현되는 매질에 대해 계산된 반사계수는 그림 5와 같은데, 앞서 측정된 반사계수와 비교하였다. 계산한 반사계수(—)의 크기와 위상이 측정치를 기준으로 각각 최대 3.13 %와 5.02 % 오차율의 정확도를 가지고 있었다. 한편 주어진 식 (6)으로 표현된 복소 유전율로부터 계산된 반사계수(- - -)는 측정결과(○)와 각각 최대 4.86 %와 6.47 %의 오차율을 가지고 있었다. 이러한 결과로부터 우리는 식 (7)에 대한 반사계수가 식 (6)의 반사계수보다 실제 측정된 메탄올의 반사계수에 더욱 근접해 있음을 알 수 있다.

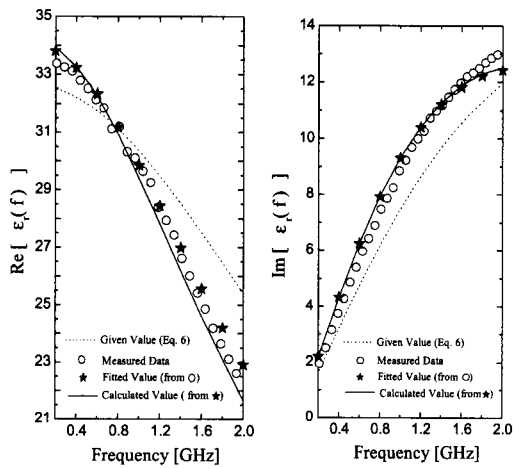
그림 5에 보여준 각각의 반사계수들을 그림 2의



(a) 반사계수의 크기 (a) Magnitude
(b) 반사계수의 위상 (b) Phase

그림 5. 메탄올의 반사계수의 비교
Fig. 5. Comparison with the reflection coefficient of methanol.

환산모델에 대입하여 복소 유전율로 환산하면 그림 6과 같다. 여기서 측정된 반사계수로부터 환산한 복소 유전율(○)을 fitting한 결과를 ★표로 나타내었으며, 이러한 매질이 프로브에 접촉되었다고 가정하여 FDTD 계산하여 구한 반사계수로부터 재환산한 복소 유전율(—)은 처음에 환산된 결과(○)와 거의 일치했다. 이때 발생한 오차는 측정치를 기준으로 실수부에서 최대 2.32 %이며, 허수부의 경우 3.42 %이다. 그림 6에서 고주파에서 수치계산된 결과와 측정치와의 차이는 유전율의 fitting 오차로 인해 발생되었으며, fitting이 완전히 측정치를 반영할 수 있다면 해결될 수 있는 문제다. 그에 비해 주어진 값(- - -)을 측정치(○)를 기준으로 비교해 보면 실수부 오차는 최대 14.69 %이며, 허수부의 경우에는 최대 14.31 %였다. 이러한 결과로부터 실제 매질의 복소 유전율은 문헌에서 주어진 식 (6)과 같지 않으며, 측정된 값과 유사하다는 결론을 내릴 수 있다. 따라서 앞서 발행했다던 20 %의 오차 중 최대 3.42 %는 FDTD를 이용한 자체 검증한 결과 본 측정방법에서의 반사계수 측정오차와 환산모델 오차였다. 나머지 16.55 %는 측정기법에 오류로 인한 오차가 아니라, 본 실험과 문헌의 측정환경 및 측정 매질의 상태의 차이로 발생된 것이라 추정된다.



(a) 실수부 (b) 허수부
(a) Real part (b) Imaginary part

그림 6. 메탄올의 복소 유전율의 비교
Fig. 6. Comparison with the complex permittivity of methanol.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 개방단말 동축선 프로브에 의해 측정된 메탄올의 복소 유전율과 문헌에 주어진 값과의 차이에 대한 원인을 규명하였다. 측정매질이 액체이므로 불완전 접촉 오차는 없다고 간주해도 좋으며, 계측기의 불확실성 오차로 인한 반사계수의 측정 오차는 상대적으로 미비하여 무시할 수 있었다. 따라서 우리가 사용한 환산모델이 실제 측정된 반사계수를 얼마나 정확하게 해당되는 복소 유전율로 환산시키는지 여부만 확인하면 된다. FDTD 기법을 도입하여 측정 오차 없이 구한 반사계수가 주어진 값에 대한 반사계수와 측정된 반사계수 중 어디로 접근하는지를 확인한 결과, 측정치로 더욱 근접하였다. 그리고 위의 반사계수를 개선된 가상의 전송선로 모델에 대입하여 복소 유전율로 다시 각각 환산하여 비교하여도 위와 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 실제 사용된 메탄올의 복소 유전율은 문헌에 주어진 함수값으로 표현되지 않으며, 오히려 측정치와 3.42 % 이내의 오차범위에서 일치함을 확인하였다. 따라서 개선된 가상의 전송선로 모델은 정확하게 반사계수를 복소 유전율로 환산하는 효과적인 알고리즘이라 할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] D. J. Daniels, *Surface-Penetrating Radar*, London, UK: IEE, 1996.

[2] 오헌철, 조유선, 현승엽, 김세윤, "지하 탐사 레이더를 이용한 누수탐지 가능성 연구", 한국전자파학회 논문지, 14(6), pp. 616-624, 2003년.

[3] A. Taflove, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, Artech House: Boston, 1995.

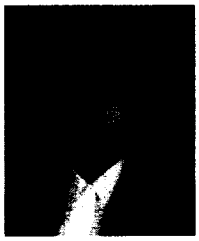
[4] A. V. Hippel, *Dielectric Materials and Applications*, Boston: Artech House, 1954.

[5] J. S. Ployer, *FDTD Modeling of Coaxial Probes*, M. S. dissertation, Univ. of New Brunswick, 1996.

[6] 신현, 현승엽, 김상욱, 김세윤, "복소유전율 측정용 개방단말 동축선 프로브의 새로운 등가모델", 1999년도 추계마이크로파 및 전파 학술대회 논

문집, 22(2), pp. 143-146, 1999년.
[7] 신현, 김세윤, 김영식, "개방단말 동축선 프로브로 측정된 마른 모래의 복소 유전율", 대한전자공학회논문지, 37(37), pp. 17-24, 2000년.
[8] 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.
[9] M. Arai, J. G. P. Binner and T. E. Cross, "Estimating errors due to sample surface roughness in microwave complex permittivity measurements obtained using a coaxial probe", *IEE Electronics Lett.*, vol. 31, no. 2, 1995.

조 유 선



1999년 2월: 제주대학교 통신공학과 (공학사)
2002년 8월: 고려대학교 전파공학과 (공학석사)
2004년 3월~현재: 고려대학교 전파공학과 박사과정
[주 관심분야] 복소 유전율 측정기법, 수치해석, 전자파 Imaging

현 승 엽

1997년 2월: 제주대학교 통신공학과 (공학사)
1999년 2월: 고려대학교 전파공학과 (공학석사)
1997년 2월~2001년 7월: KIST 영상미디어 연구센터 학생연구원
1999년 3월~현재: 고려대학교 전파공학과 박사과정
2001년 8월~2003년 10월: SG Technology 연구소 주임연구원
2003년 11월~2004년 현재: LG DA 연구소 선임연구원
[주 관심분야] 지하탐사레이더, 안테나 설계, 전자파 Imaging

김 세 윤

1978년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
1980년 2월: KAIST 전기 및 전자공학과 (공학석사)
1984년 8월: KAIST 전기 및 전자공학과 (공학박사)
1986년 11월: KAIST 전기 및 전자공학과 (Post-doctor)
1986년 12월~현재: KIST 영상미디어 연구센터 책임연구원
[주 관심분야] 파동의 회절 및 복사, 전자파 Imaging, 안테나 설계, EMI/EMC