

내심이 돌출된 개방단말 동축선 프로브

Open-Ended Coaxial Probe with Protruding Inner Conductor

정 지 현 · 조 유 선 · 김 세 윤*

Ji-Hyun Jung · Yu-Sun Jo · Se-Yun Kim*

요 약

개방단말 동축선 프로브는 넓은 주파수 대역에서 매질의 복소 유전율을 측정하는데 사용된다. 기준매질과 측정매질의 반사계수의 차이가 작은 경우에는, 기존의 동축선 프로브로 측정된 복소 유전율은 계측기의 불확정도(uncertainty)에 의해 심한 동요를 보인다. 본 논문에서는 기준매질과 측정매질의 반사계수 차이를 증가시키기 위하여 내심이 돌출된 개방단말 동축선 프로브를 제안하였다. 내심이 돌출된 개방단말 동축선 프로브의 타당성은 FDTD 수치해석과 실제 측정을 통해 확인하였다.

Abstract

Open-ended coaxial probe is used to measure complex permittivities of materials in a wide bandwidth. Complex permittivity measured by a conventional coaxial probe suffers from severe fluctuation due to instrumental uncertainty when the difference between reflection coefficients of reference and measuring materials is small. In this paper, open-ended coaxial probe with protruding inner conductor is suggested to increase the difference between reflection coefficients of reference and measuring materials. Its validity is assured by FDTD simulation and actual measurement.

Key words : Open-Ended Coaxial Probe, Complex Permittivity, FDTD

I. 서 론

매질의 복소 유전율은 매질의 전기적인 특성을 나타내는 파라미터로 실수부분인 유전율과 도전율을 포함하는 허수부분의 합으로 표현된다. 복소 유전율 측정방법으로는 공동공진기법, 전송선로법, 개방단말 동축선 프로브법 등의 방법이 있는데, 이러한 측정방법들은 측정매질의 적용범위, 측정과정의 용이성, 측정결과의 정확성 등의 면에서 각각 장단점이 있다^[1]. 본 연구실에서는 정확성은 공동공진기법이나 전송선로법에 비해 떨어지지만, 넓은 주파수 대역에서 측정이 가능하고, 측정매질을 가공하지 않고 복소 유전율을 측정할 수 있는 개방단말 동축선 프로브법을 사용하여 매질의 복소 유전율을 측정하

고 있다.

개방단말 동축선 프로브법은 측정매질과 기준매질인 물과 공기의 반사계수를 측정하고 측정 결과를 환산모델에 적용하여 복소 유전율을 환산한다. 이때 측정매질과 기준매질간의 반사계수 크기의 차이가 작은 경우에는 복소 유전율 환산과정에서, 계측기가 가지고 있는 시스템상의 오차, 동축선에 의한 오차 등 측정 오차에 민감해질 수 있다.

측정 오차에 대한 민감도를 줄이기 위한 방법으로, 본 논문에서는 내심이 돌출된 개방단말 동축선 프로브를 제안한다. 내심이 돌출된 동축선 프로브는 기존의 개방단말 동축선 프로브에서 내심이 프로브 밖으로 돌출된 구조로, 돌출된 내심이 안테나의 역할을 하여 프로브 개구면에서 프로브 밖으로 방사

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

*한국과학기술연구원 영상미디어연구센터(Imaging Media Research Center, KIST)

· 논문 번호 : 20040810-100

· 수정완료일자 : 2005년 1월 5일

(radiation)되는 전파의 양이 많아지므로 반사계수의 크기는 기존 프로브에 의한 반사계수 크기보다 작아지게 된다. 따라서 내심이 돌출된 개방단말 동축선 프로브를 사용하면, 측정매질과 기준매질의 반사계수 크기의 차이가 커지게 되어 측정오차에 대한 민감도는 줄어 들 수 있을 것이다.

본 논문에서는 FDTD 수치해석을 통해 최적의 내심길이를 구하였고, 이를 제작한 후 측정된 결과로부터 내심의 돌출효과를 살펴보았다.

II. 내심이 돌출된 개방단말 프로브와 FDTD 수치계산

본 연구실에서 기존에 사용하고 있는 개방단말 동축선 프로브는 그림 1에서 보듯이 끝단을 평평하게 절단하고 절단면에 접지판을 부착한 구조로 내심의 반경이 1.1305 mm, 외심의 반경이 3.7085 mm, 접지판 반경이 2 cm이며, 그 사이는 Teflon($\epsilon_c = 20.3$)으로 채워져 있다.

개방단말 동축선 프로브를 측정매질과 기준매질에 접촉하고 회로망 분석기(Network Analyzer: Agilent 8714C)를 사용하여 각각의 반사계수를 측정한 뒤에 측정된 반사계수 값들을 환산모델에 적용하여 측정매질의 복소 유전율을 구할 수 있다.

그림 2는 기존의 개방단말 동축선 프로브를 이용하여 실리콘 고무의 반사계수를 측정하고, 측정된 반사계수로부터 복소 유전율을 환산한 결과이다. 이때 기준매질로는 물과 공기를 사용하였고, 복소 유

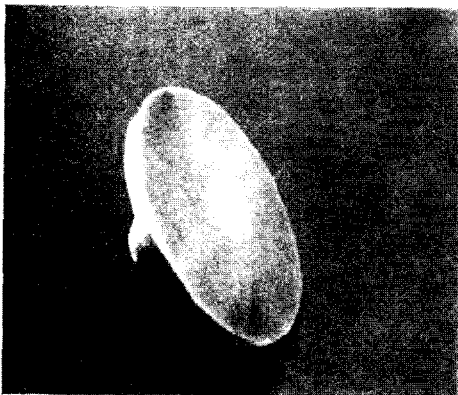
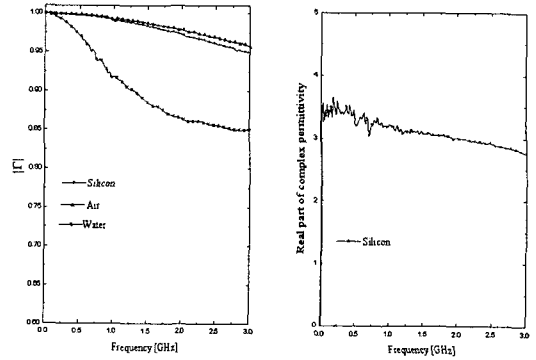


그림 1. 개방단말 동축선 프로브
Fig. 1. Open-ended coaxial probe.



(a) 측정된 반사계수의 크기 (b) 환산된 복소 유전율의 실수부
(a) Amplitude of measured reflection coefficients (b) Real part of converted permittivity

그림 2. 실리콘 고무의 측정된 반사계수와 환산된 복소 유전율

Fig. 2. The measured reflection coefficients and converted complex permittivity of silicon.

전을 환산에 사용된 환산 모델은 본 연구실에서 제안한 가상의 전송선^[2]을 개선한 모델^[3]로 그 정확성을 확인한바있다^[4].

환산된 복소 유전율을 결과인 그림 2(b)를 보면 대략 0~1 GHz에서의 복소 유전율 값은 다른 주파수 대역인 1~3 GHz에서의 복소 유전율 값보다 동요(fluctuation)가 심한 것을 볼 수 있다. 이는 반사계수들 간의 차가 작은 경우에는 환산 모델이 측정 오차에 민감하게 반응한 결과로 유추할 수 있는데, 그림 2(a)를 보면 0~1 GHz에서 측정된 반사계수들 간의 차이가 1~3 GHz에서의 반사계수들 간의 차이보다 작은 것을 알 수 있다.

이러한 결과로부터 측정매질과 기준매질들 간의 반사계수 크기의 차이가 커지게 되면, 환산과정에서 측정 오차에 대한 민감도를 줄어 들게 할 가능성이 있다. 왜냐하면 계측기의 불확정도(uncertainty)는 계측기 자체의 오차로 측정상황과 관계없이 일정한 값을 가지므로 매질들의 반사계수 차이가 커지게 되면 계측기의 오차를 포함한 측정 값들 사이의 상호 영향은 줄어 들 것이다. 즉 대부분의 유전체에 대한 반사계수의 크기는 0과 1 사이에 있는데, 특히 최대 값(공기)과 최소 값(물) 사이에 존재한다. 이러한 대부분의 유전체의 반사계수는 복소 유전율로 환산될 때 상대유전상수 1(공기)에서 81(물) 사이의 값으로 환산

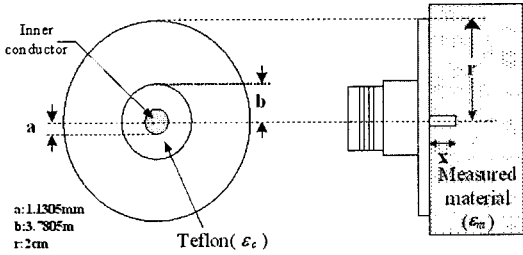


그림 3. 내심이 돌출된 개방단말 동축선 프로브의 구조
Fig. 3. Geometry of open-ended coaxial probe with protruding inner conductor.

된다. 이는 반사계수의 크기 변화폭은 1보다 작지만, 이로부터 환산된 상대유전상수의 변화폭은 80배 이상 증폭됨을 의미한다. 이때 반사계수에 포함된 측정 오차도 함께 커지게 된다. 따라서 반사계수의 크기 변화폭이 크면 복소 유전율로 환산될 때의 증폭률이 줄어들게 되므로, 측정 오차가 미치는 영향도 줄어들게 되어 결국 환산과정에서 측정 오차에 대한 민감도를 줄어지게 할 수 있다.

복소 유전을 환산 과정에서 측정 오차에 대한 민감도를 줄이기 위한 방법으로 본 논문에서는 내심이 돌출된 개방단말 동축선 프로브를 제안하였다. 그림 3은 내심이 돌출된 개방단말 동축선 프로브로 돌출된 내심의 길이를 'X'로 나타내었다. 최적의 내심길이 'X'는 분산 FDTD 수치해석방법을 적용하여 구할 수 있고, 수치해석결과 중 반사계수들의 크기가 선형적으로 변하는 값 중에서, 반사계수간의 차이를 크게 하는 값을 최적의 내심의 길이로 선택할 수 있다.

FDTD 수치해석을 위한 구조로, 측정매질에 개방단말 동축선 프로브가 접촉되어 있는 구조의 단면을 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 'a'는 동축선 프로브 내심의 반지름, 'b'는 외심의 반지름으로 그림 3에서와 동일한 값이고, Δρ와 Δz는 cell의 크기로 본 논문에서는 Δρ=Δz=0.02 mm의 값을 갖는다. 개방단말 동축선 프로브는 z축을 기준으로 회전 대칭 구조이고, 여기에 인가되는 전자파는 TEM 모드로 전계와 자계가 ϕ 방향으로 일정하다. 따라서 반사계수를 계산하기 위한 FDTD 수치계산은 임의의 ϕ=ϕ0인 평면, 즉 그림 4의 상단부에 대해서만 수행된다.

측정매질이 물 또는 흙과 같은 Debye 분산 특성을 갖는 경우에 대한 해석을 위해서 분산 FDTD 수

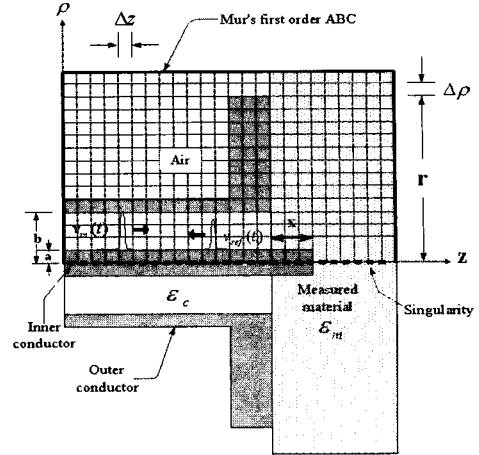


그림 4. 내심이 돌출된 개방단말 동축선 프로브의 FDTD 계산영역
Fig. 4. FDTD calculation region of an open-ended coaxial probe with protruding inner conductor.

치해석을 하였다. 분산매질에 대한 맥스웰 방정식을 2차원 FDTD 식으로 유도하기 위하여 재환적 컨볼루션(recursive convolution)을 이용하였다^[5].

시간이 $t = (n + \frac{\Delta t}{2}) = (n + \frac{1}{2})$ 이고, 위치가 $(\rho, z) = (i\Delta\rho, j\Delta z) = (i, j)$ 일 때의 E_ρ, E_z, H_ϕ 는 각각 다음과 같이 표현된다.

$$E_\rho^{n+1}(i, j) = \left(\frac{2\epsilon_0\epsilon_{rx} - \sigma\Delta t}{2\epsilon_0\epsilon_{rx} + 2\epsilon_0X_0 + \sigma\Delta t} \right) E_\rho^n(i, j) + \left(\frac{2\epsilon_0}{2\epsilon_0\epsilon_{rx} + 2\epsilon_0X_0 + \sigma\Delta t} \right) \Psi_\rho^n(i, j) + \left(\frac{2\Delta t}{2\epsilon_0\epsilon_{rx} + 2\epsilon_0X_0 + \sigma\Delta t} \right) \left[\frac{H_\phi^{n+\frac{1}{2}}(i, j-1) - H_\phi^{n+\frac{1}{2}}(i, j)}{\Delta z} \right] \quad (1)$$

$$E_z^{n+1}(i, j) = \left(\frac{2\epsilon_0\epsilon_{rz} - \sigma\Delta t}{2\epsilon_0\epsilon_{rz} + 2\epsilon_0X_0 + \sigma\Delta t} \right) E_z^n(i, j) + \left(\frac{2\epsilon_0}{2\epsilon_0\epsilon_{rz} + 2\epsilon_0X_0 + \sigma\Delta t} \right) \Psi_z^n(i, j) + \left(\frac{2\Delta t}{2\epsilon_0\epsilon_{rz} + 2\epsilon_0X_0 + \sigma\Delta t} \right) \cdot \left[\frac{H_\phi^{n+\frac{1}{2}}(i, j) - H_\phi^{n+\frac{1}{2}}(i-1, j)}{\Delta\rho} + \frac{H_\phi^{n+\frac{1}{2}}(i, j) + H_\phi^{n+\frac{1}{2}}(i-1, j)}{2\rho} \right] \quad (2)$$

$$H_\phi^{n+\frac{1}{2}}(i, j) = H_\phi^{n-\frac{1}{2}}(i, j) + \frac{\Delta t}{\mu} \left[\frac{E_z^n(i+1, j) - E_z^n(i, j)}{\Delta\rho} - \frac{E_z^n(i, j+1) - E_z^n(i, j)}{\Delta z} \right] \quad (3)$$

여기서

$$\Psi^n = E^n \Delta X_0 + e^{-\frac{\Delta t}{\tau} \Psi^{n-1}} \quad (4)$$

$$X_0 = (\epsilon_{rs} - \epsilon_{rxz}) [1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}] \quad (5)$$

이다.

분산 FDTD 수치해석으로부터 구한 기준매질인 물과 공기의 반사계수에 대한 신뢰성은 그림 5에서 $\Delta \rho$ 와 Δz 로 표현된 cell의 크기가 줄어드는 경우에 물에 대한 반사계수의 수렴으로 확인할 수 있다.

라운드-오프 오차(round off error)가 증가하지 않는 범위 내에서는 cell의 크기가 줄어들수록 계산의 정확성이 향상된다. 그림 4는 측정매질이 물(증류수) 일 때 cell의 크기가 $\lambda_{\min}/11.964$, $\lambda_{\min}/23.8$, $\lambda_{\min}/30$ 로 점차 감소함에 따른 반사계수의 크기 변화를 나타내고 있다. Cell의 크기를 $\lambda_{\min}/23.8$ 로 할 경우에 $\lambda_{\min}/30$ 에 비해 정확성 면에서 크게 떨어지지 않으면서, 계산시간이 적게 걸리는 $\lambda_{\min}/23.8$ 을 cell의 크기로 하여 수치계산을 하였다.

그림 5에서 확인된 FDTD 수치계산의 신뢰성을 바탕으로 내심이 돌출된 프로브의 최적의 내심 길이를 구하였다. 내심의 길이를 0 mm에서부터 5 mm까지 1 mm 길이 간격으로 증가시키면서 두 기준매질인 물과 공기의 반사계수 크기 변화를 보았고, 그림 6에 결과를 나타내었다.

내심이 길어질수록 물의 반사계수의 크기는 작아지는 경향을 보였지만, 공기의 반사계수의 크기는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 따라서 내심의 길이가 증가할수록 기준매질인 물과 공기 반사계수 크기의 차이는 증가하게 된다.

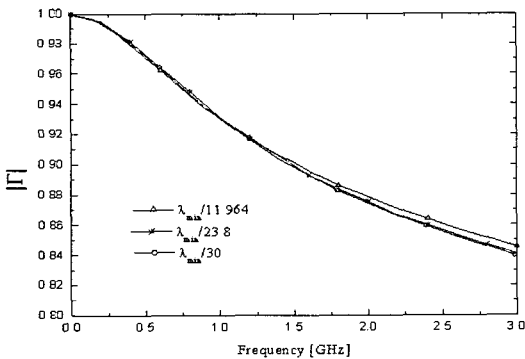


그림 5. FDTD 수치 계산 결과의 수렴
Fig. 5. Convergence of FDTD simulation results.

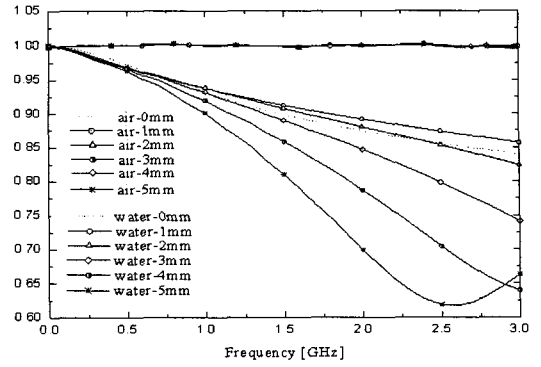


그림 6. 내심의 길이에 따른 반사계수 크기 변화
Fig. 6. Amplitude variation of reflection coefficients according to the length of protruding inner conductor.

앞에서 언급한 것처럼 최적의 내심 길이는 반사계수 크기가 선형적으로 변하면서 공기와 물의 반사계수 크기의 차이를 가장 크게 하는 길이여야 한다.

보다 정확한 최적의 내심 길이를 구하기 위하여 4 mm 부근의 길이를 0.2 mm 길이 간격으로 변화시키면서 FDTD 수치해석한 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림 7로부터 내심의 길이를 0.2 mm 간격으로 변화시키며 수치계산하였을 때, 반사계수의 크기가 선형적으로 변하면서 기준매질인 공기와 물의 반사계수 크기차이를 가장 크게 하는 최적의 내심의 길이는 3.8 mm임을 알 수 있다.

내심의 길이가 3.8 mm인 개방단말 동축선 프로브를 사용하여 기준매질인 물, 공기와 측정매질인 마

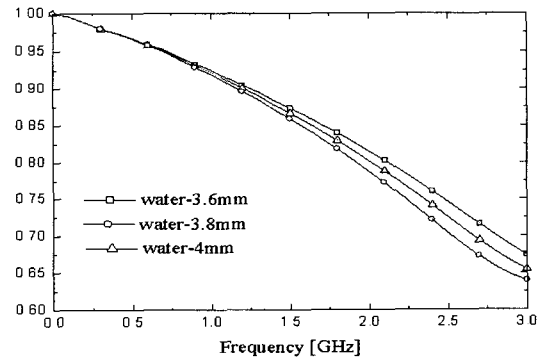
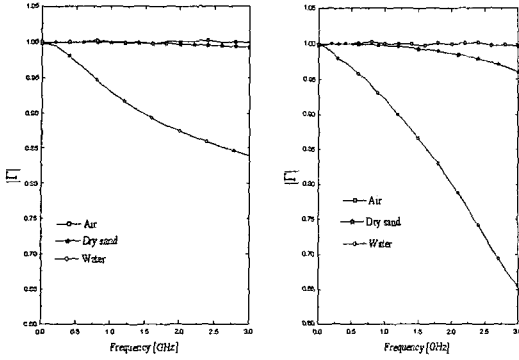


그림 7. X=3.6, 3.8, 4.0 mm인 경우 물의 반사계수 크기 변화
Fig. 7. Variation of amplitude of reflection coefficients of water for X=3.6, 3.8 and 4.0 mm.



(a) 기존의 프로브 (b) 내심이 돌출된 프로브
 (a) Conventional coaxial probe (b) Probe with protruding inner conductor

그림 8. 돌출된 내심의 유무에 따른 프로브의 반사계수 크기 변화 비교

Fig. 8. Comparison between amplitudes of reflection coefficients for probes with and without protruding inner conductor.

른 모래의 수치계산한 반사계수 크기를 그림 8(b)에, 기존의 개방단말 동축선 프로브를 사용하여 동일한 상황에서 수치 계산한 반사계수 크기를 그림 8(a)에 나타내어 내심의 길이에 따른 반사계수들 간의 크기 변화를 보았다.

기존의 개방단말 동축선 프로브에 대한 수치계산 결과인 그림 8(a)를 보면 기준매질인 공기와 측정매질인 모래의 반사계수 크기는 각각 1에 가까운 값을 가지며, 3 GHz에서 두 매질의 반사계수 크기의 차는 0.0064로 매우 작음을 알 수 있다. 이에 비해 내심이 3.8 mm인 개방단말 동축선 프로브에 대한 수치계산 결과인 그림 8(b)를 보면 기준매질인 공기와 측정매질인 모래의 반사계수 크기의 차가 3 GHz에서 0.0325816으로 기존의 개방단말 동축선 프로브에 비해 반사계수 크기의 차이가 증가했음을 볼 수 있다. 또한 기준매질인 물과 공기의 반사계수 크기 차이를 3 GHz에서 비교해 보았을 때 기존 개방단말 동축선 프로브의 경우 0.159296에서 내심이 돌출된 개방단말 동축선 프로브의 경우 0.341925로 증가함을 볼 수 있다.

III. FDTD 수치계산 결과와 측정결과의 비교

FDTD 수치해석 결과를 바탕으로 내심이 3.8 mm



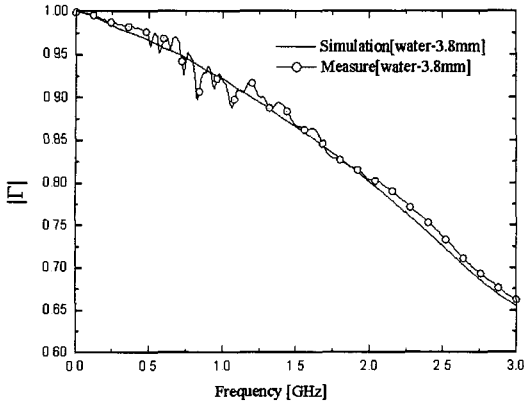
그림 9. 내심이 돌출된 개방단말 동축선 프로브
 Fig. 9. Open-ended coaxial probe with protruding inner conductor.

돌출된 개방단말 프로브를 제작하였고, 제작된 프로브를 그림 9에 나타내었다.

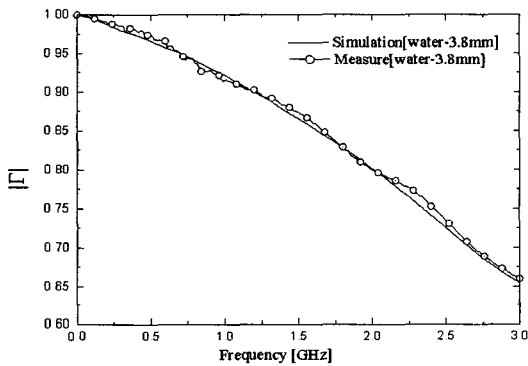
실제 제작된 내심이 돌출된 개방단말 동축선 프로브를 이용하여 물에 대한 측정된 반사계수와 수치계산된 반사계수 결과를 그림 10에 나타내었다.

그림 10(a)를 보면 측정된 반사계수가 저주파수에서는 변화가 심하지만, 전체적으로는 측정결과와 수치계산으로 얻어진 결과의 형태가 일치함을 알 수 있다. 그림 10()에서 저주파대역에서 측정된 반사계수의 크기 변화가 심한 이유는 측정매질을 담는 용기의 크기가 가로: 10 cm, 세로: 8.5 cm, 높이: 6 cm에 물의 높이는 6 cm로 용기의 크기가 유한하여, 용기에서 반사된 파가 측정결과에 영향을 주었기 때문이다.

그림 10(b)는 용기의 크기를 크게 하여 측정한 결과이다. (b)의 측정에 사용한 용기의 크기는 가로: 27 cm, 세로: 20.5 cm, 높이: 14 cm에 물의 높이는 9 cm로, 용기의 크기가 커지면 용기에 의한 영향이 나타나지 않음을 알 수 있다. 저주파수에서 용기 크기의 영향을 많이 받는 이유는 저주파일 경우 전기적 길이(electrical length)가 고주파에 비해서 길어지게 되므로, 고주파에 비해서 측정매질을 담는 용기의 크기가 상대적으로 작아지게 되기 때문이다. 또한 측정결과와 수치계산으로 얻어진 결과 1% 정도의 차이를 보이는 이유는 측정과정에서 발생한 측정 오차의 영향으로, 계측기가 가지고 있는 시스템상의 오차, 동축선에 의한 오차, 동축선과 프로브의 연결과정(connection)에서의 오차 등이 반사계수 측정에 영



(a) $10 \times 8.5 \times 6$ cm인 작은 용기에 담긴 물의 반사계수 크기
 (a) Amplitude of reflection coefficient of water in small container with $10 \times 8.5 \times 6$ cm



(b) $27 \times 20.5 \times 14$ cm인 큰 용기에 담긴 물의 반사계수 크기
 (b) Amplitude of reflection coefficient of water in large container with $27 \times 20.5 \times 14$ cm

그림 10. 서로 다른 크기의 용기에 담긴 물의 측정 결과와 수치계산 결과의 비교
 Fig. 10. Comparison between calculated and measured reflection coefficients of water contained in two different sized container.

향을 주어서 발생한 결과이다.

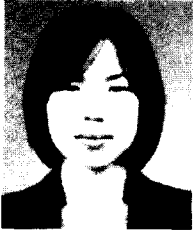
IV. 결 론

본 논문에서는 측정된 반사계수로부터 복소 유전율을 환산하는 과정에서 측정오차에 대한 환산모델의 민감도를 줄이기 위한 방법으로 내심이 돌출된 개방단말 동축선 프로브를 제안하였다. 내심이 돌출된 개방단말 동축선 프로브의 최적의 내심 길이를 분산 FDTD 수치해석 방법을 사용하여 수치계산하였고, 그 결과 내심의 길이가 3.8 mm인 경우에 기준 매질인 물과 공기의 반사계수 크기의 차가 가장 커지는 것을 알 수 있었다. 수치해석 결과를 바탕으로 내심이 돌출된 개방단말 동축선 프로브를 제작하였고, 제작된 프로브를 사용하여 측정한 물의 반사계수와 수치해석으로부터 구한 물의 반사계수를 비교하여 두 결과가 일치하며, 기존의 프로브보다 물과 공기의 반사계수 크기의 차이가 커지는 것을 보았다. 따라서 내심이 돌출된 프로브를 사용하면 환산모델의 측정오차에 대한 민감도를 줄일 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

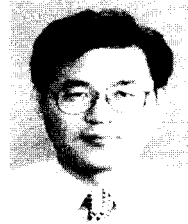
- [1] 신현, "개방단말 동축선 프로브를 이용한 매질의 특성", 고려대학교 석사학위 논문, 1999년.
- [2] F. M. Ghannouchi, R. G. Bosisio, "Measurement of microwave permittivity using a six-port reflectometer with an open-ended coaxial line", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-38, no. 2, pp. 505-508, 1989.
- [3] 신현, 현승엽, 김상욱, 김세윤, "복소유전율 측정용 개방단말 동축선 프로브의 새로운 등가모델", 추계마이크로파 및 전파 학술대회 논문집, vol. 22, no. 2, pp. 143-146, 1999년.
- [4] 조유선, "개방단말 동축선 프로브법의 오차에 관한 연구", 고려대학교 석사학위 논문, 2000년.
- [5] J. S. Ployer, "FDTD modeling of Coaxial probes", *M. S. Dissertation*, Univ. of New Brunswick, 1996.

정 지 현



2004년 2월: 단국대학교 전자공학과 (공학사)
2004년 2월~현재: 고려대학교 전파공학과 석사과정
[주 관심분야] 복소 유전율 측정기법, 수치해석

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

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