

오차에 대한 3가지 개방단말 동축선 프로브의 환산모델들간 안정성 연구

⁰조유선***, 현승엽***, 김상욱**, 김세윤**

*고려대학교 전파공학과

**한국과학기술연구원 영상미디어연구센터

Tel. 02-958-6824

Fax. 02-958-5769

A Stability Study of Three Open-Ended Coaxial Probe Conversion Models under the Error Situations

⁰Yu-Sun Jo***, Seung-Yeup Hyun***, Sang-Wook Kim**, and Se-Yun Kim**

*Department of Radio Sciences and Engineering, Korea University

**Imaging Media Research Center, Korea Institute of Science and Technology

E-mail : parose@imrc.kist.re.kr, ksy@imrc.kist.re.kr

ABSTRACT

개방단말 동축선 프로브는 임의의 매질에 접촉하여 복소 유전율을 구하므로 사용이 용이한 측정법이다. 복소 유전율의 측정 과정은 두 단계로 구성된다. 먼저 프로브의 개구면을 미지의 매질에 접촉시켜서 반사계수를 측정한다. 다음에는 반사계수를 환산모델에 대입하여 복소 유전율을 구한다. 그러나 실제 측정시 발생하는 오차들에 대해 취약하다는 단점을 가지고 있다. 정확성을 떨어뜨리는 주요 오차 요인으로는 프로브의 개구면과 측정매질 사이의 공극으로 인한 불완전 접촉오차와 프로브의 제작 한계로 인한 오차를 들 수 있다. 본 논문에서는 이런 오차상황에서 유한 차분 시간영역법으로 반사계수를 계산하고나서 환산모델에 의해 복소 유전율로 환산함으로써 오차에 대한 환산모델들간의 안정성을 살펴보고자 한다.

I. 서론

매질의 복소 유전율을 측정하는 방법은 공동공진기법(cavity resonator method)[1], 전송선로법(transmission-line method)[2], 개방단말 동축선 프로브법(open-ended coaxial probe method)[3] 등이 있다. 그중 공동공진기법과 전송선로법은 높은 정확성을 보이나, 측정매질을 채취해서 정확한 크기로 가공해야만 한다는 불편을 가지고 있다. 그러나 개방단

말 동축선 프로브법은 그림 1의 프로브 접지판을 매질 표면에 직접 접촉하여서 사용하므로 매질을 채취하거나 가공할 필요가 없다. 이러한 점 때문에 실험 현장에서 복소 유전율을 측정하여야 하는 분야에서 주로 쓰인다[4]. GPR(ground-penetrating radar) 시스템을 개발한 바 있는 본 연구팀[5]에서도 이러한 이유로 개방단말 동축선 프로브법을 사용하여 배경 매질의 복소 유전율을 알아내고 있다. 그러나 개방단말 동축선 프로브법은 측정매질 표면과 프로브사이

에 존재하는 공극들로 인한 오차나 프로브 제작 시 오차 등에 민감하다. 이런 오차들로 인해 개방단말 동축선 프로브법은 앞의 두 방법보다 정확성이 떨어진다.

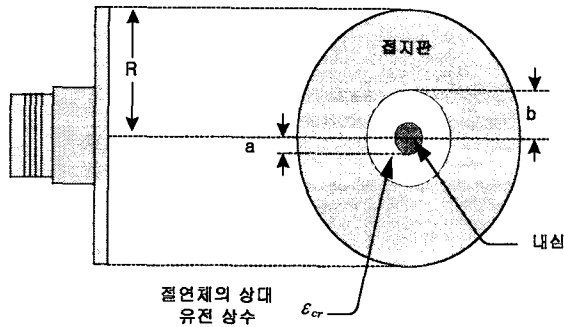


그림 1. 개방 단말 동축선 구조

복소 유전율을 구하기 위해서는 그림 2의 ①과 같이 먼저 프로브를 미지의 매질에 프로브를 접촉시킨다. 그리고 나서 ②와 같이 회로망 분석기(vector network analyser)를 사용하여 반사계수를 측정한다. ③에서는 이렇게 측정된 반사계수를 환산모델에 대입하여 복소 유전율로 환산한다.

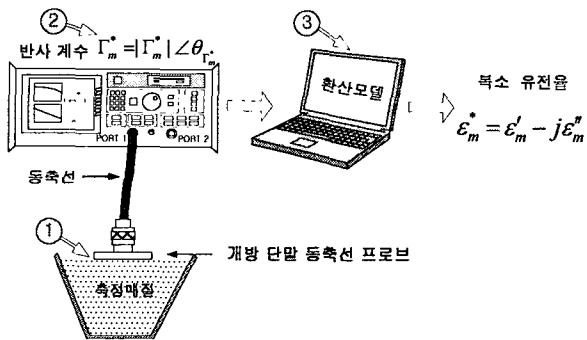


그림 2. 복소 유전율 측정 과정

①, ②, ③과 같은 일련의 과정에서는 모두 오차를 포함한다. 그 중 ①에서 측정매질이 매끈한 면이 아닐 경우 프로브와의 접촉면 사이에 공극이 존재한다. 이것은 과정 ②에서 반사계수의 오차를 발생시킨다. 그리고 프로브의 제작한계도 중요한 오차의 원인이다. 그런데 같은 반사계수가 입력되더라도 환산모델에 따라 계산된 복소 유전율의 오차율이 다르다. 따라서 여러 환산모델의 오차에 대한 안정성을 연구할 필요가 있다. 본 논문에서는 다음과 같은 환산 모델

들-캐패시터 모델[6], MoM 모델[7], 그리고 본 연구팀이 개발한 바 있는 가상의 전송선로 모델[8]-을 선택하여 위의 두 가지 오차에 대한 안정성을 각각 비교하였다. 본 논문에서는 특정 오차에 대한 복소 유전율의 영향만을 확인하고 오차를 제어하기 위해 ②의 과정을 유한 차분 시간영역법(finite difference time-domain method)을 이용한 반사계수의 계산으로 대체하였다.

II. FDTD 계산영역

그림 3은 개방단말 동축선 프로브의 단면도이다. 복소 유전율이 $\epsilon_m^* = \epsilon_0 \epsilon_{mr}^* = \epsilon_m' - j\epsilon_m''$ 인 임의의 균일한 측정매질에 프로브가 접촉되어 있다. 동축선 프로브는 내심의 반지름이 $a=1.4364\text{mm}$ 이고, 외심의 반지름이 $b=4.725\text{mm}$ 이며 그 사이에 절연체 매질 $\epsilon_c = \epsilon_0 \epsilon_{cr}$ 로 채워져 있다. 동축선 끝단은 반지름 R 인 원형 도체 평판으로 종단되어 있다. 프로브는 z 축으로 대칭이기 때문에, 반사계수를 구하기 위한 FDTD 시뮬레이션은 ϕ 가 일정한 임의의 한 면에 대해서만 수행한다. 프로브 절단면도의 동심축을 제외한 가장자리는 Mur의 1차 흡수 경계 조건으로 처리하였다. 동심축 상에서는 Ampere 법칙을 적용하여 Singularity를 처리하였다.

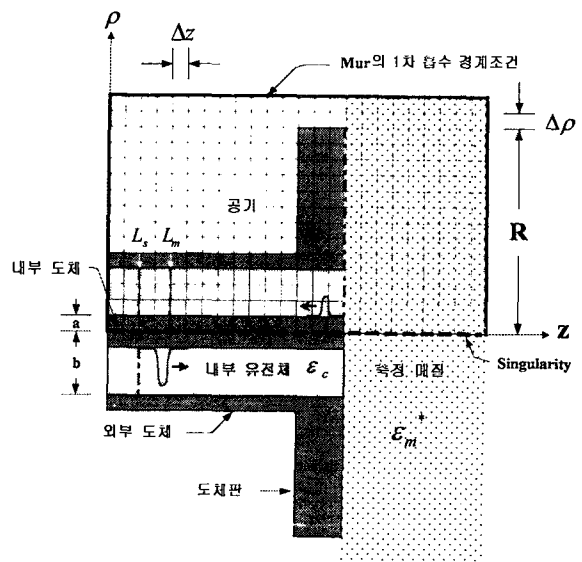
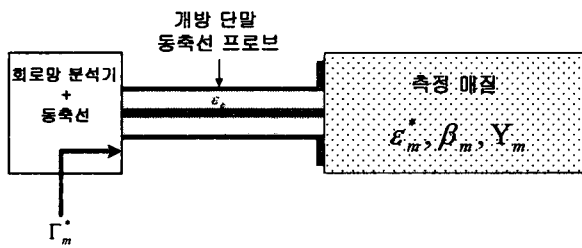


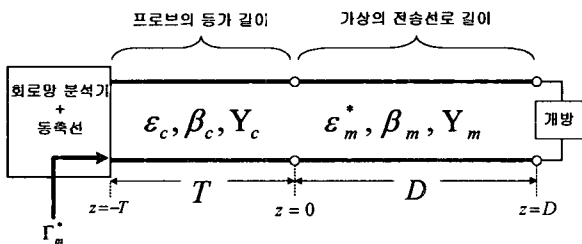
그림 3. 유한 차분 시간영역법의 계산 영역

III. 환산모델

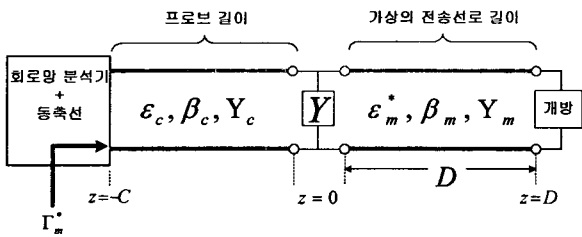
본 논문에서는 2가지의 기준매질을 사용하는 환산 모델로 캐패시터 모델과 가상의 전송선로 모델을 선택하였다. MoM 모델은 프로브 구조에 대한 전자파를 정확하게 해석하여 복소 유전율을 환산해내므로 위의 2가지 환산 알고리즘을 검증하기 위해 선택되었다.



(a) 프로브와 측정매질



(b) 기존의 가상의 전송선로 모델



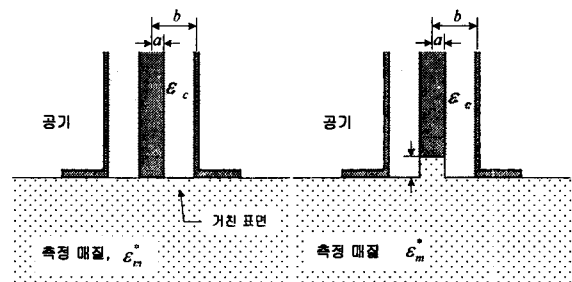
(c) 새로운 가상의 전송선로 모델

그림 4. 가상의 전송선로 모델

가상의 전송선로 모델은 Ghannaouchi 등 [9]에 의해 처음으로 제안되었다. 그림 4(a)는 측정매질의 복소 유전율을 측정하기 위하여 개방단말 동축선 프로브가 매질에 접촉한 경우이다. 기존의 모델일 경우에는 회로망 분석기와 연결된 동축선의 끝단에서 교정 (Calibration)을 하였다. 그래서 그림 4(a)의 개방단말

동축선 프로브는 그림 4(b)에서 프로브의 등가 길이 T 로 나타내었다. 그리고 그림 4(a)의 측정매질은 그림 4(b)에서 가상의 전송선로의 길이 D 로 나타내었다. $z=0$ 인 지점에서는 서로 다른 특성 임피던스, 전파 상수의 전송선로가 연결되어있으므로 이 지점에서 반사파가 발생한다. 그리고 $z=0$ 인 지점에서의 반사계수를 복소 유전율로 환산한다. 그러나 프로브의 등가 길이 T 는 복소수로 구해진다. 왜냐하면 등가 파라미터 T 가 프로브의 길이와 개구면에서의 매질 불연속면을 모두 포함하기 때문이다. 이러한 점 때문에 새로운 가상의 전송선로 모델이 제안되었다. 새로운 모델은 기존의 모델과는 달리 프로브의 개구면에서 위상을 보상함으로써 교정을 하였다[8]. 따라서 프로브의 물리적인 길이는 미지수에서 제외된다. 그림 4(a)에서 프로브 개구면의 불연속면은 그림 4(b)에서 어드미턴스 Y 로 나타내었다. 이 점이 기존의 모델과 우리의 모델의 차이점이다. 가상의 전송선로 D 는 기존 모델과 같다. Y, D 를 알면 미지 매질의 복소 유전율을 구할 수 있다. 먼저 기준매질 ($\epsilon_1^*, \epsilon_2^*$)에 대한 각각의 반사계수 (Γ_1^*, Γ_2^*)를 구하고 이들로부터 Y, D 를 계산한다. 그리고 나서 미지의 매질을 프로브에 접촉시키고 반사계수 (Γ_m^*)를 계산한다. 계산된 미지 매질의 반사계수는 환산모델에 의해 복소 유전율 (ϵ_m^*)로 환산된다[8].

IV. 수치계산 결과

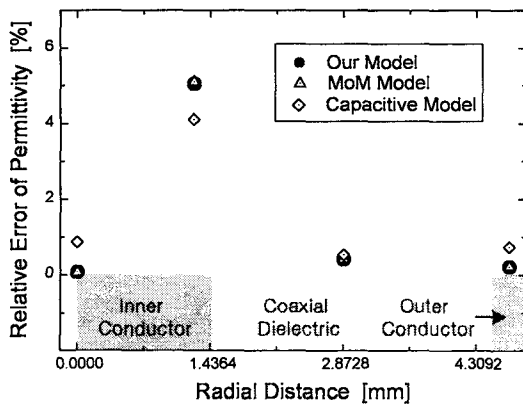


(a) 측정매질 표면이 거칠 경우 (b) 내심이 움푹 들어간 경우

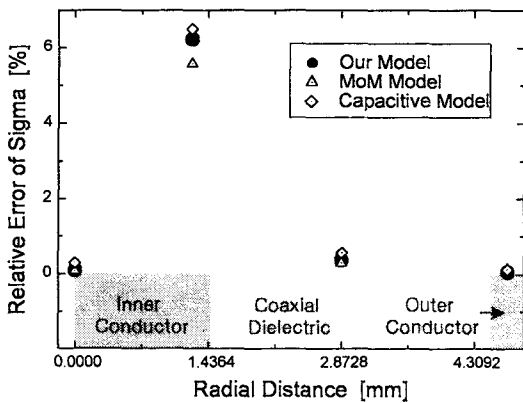
- (a) 측정매질 표면이 거칠 경우
- (b) 내심이 움푹 들어간 경우

그림 5. 수치계산한 오차

대표적인 오차상황으로 그림 5의 두 가지를 들어 수치계산 하였다. 두 가지 기준 매질은 우리 일상에서 쉽게 구할 수 있는 공기와 증류수를 사용하였다. 증류수는 Debye 공식[10]($\epsilon_{ms}=78.197$, $\epsilon_{m\infty}=5.188$, $\tau_m=8.192ps$)으로 표현된다. 우리가 구하고자 하는 측정매질은 분산 특성을 가진 흙이며 Debye 공식($\epsilon_{ms}=20.5$, $\epsilon_{m\infty}=4.0$, $\tau_m=8.592ps$, $\sigma_m=0.12S/m$)으로 표현된다. 캐패시터 모델과 우리의 가상의 전송선로 모델이 TEM 환경에서 유도되었으므로 비교되는 주파수는 사용된 동축선의 차단 주파수(5GHz)와 차이를 두고 1.4GHz에서 오차율을 비교하였다.



(a) 유전율의 상대오차



(b) 도전율의 상대오차

그림 6. 프로브 개구면과 측정매질 사이의 공극의 위치에 따른 복소 유전율의 상대오차

그림 5(a)는 측정매질의 표면이 매끄럽지 못하여 프로브와의 경계면에 공극이 존재하는 경우이다. 공극의 위치에 따른 복소 유전율의 오차율을 보기 위하여 공극 1개($0.17955mm \times 0.17955mm$)가 각각 내심의 중심, 내심의 가장자리, 내부 유전체의 중심 그리고 외심의 가장자리에 있을 때 반사계수를 계산하였다. 그리고 계산된 반사계수는 캐패시터 모델, MoM 모델, 우리의 가상의 전송선로 모델에 의해 복소 유전율로 환산된다. 그림 6(a),(b)에서 프로브 개구면에서 ρ 방향으로의 거리에 따른 유전율과 도전율의 상대오차이다. 공극이 내심의 가장자리에 공극이 있을 때의 유전율 오차 세 모델 모두 4~6%로 다른 위치에서보다 높았다.

그림 5(b)는 프로브의 제작 시 오차로 내심이 움푹 들어간 경우이다. 내심이 들어간 길이 L에 따른 복소 유전율의 오차율은 그림 7(a),(b)이다. 그림 7(a)로부터 L이 $0.03066mm$ 미만일 때 캐패시터 모델의 유전율 상대오차가 10% 미만임을 확인할 수 있다. MoM 모델은 $0.09787mm$ 미만일 때이다. 그에 반해 가상의 전송선로 모델은 주어진 모든 범위에서 오차 10% 미만으로 안정되었다. 그림 7(b)은 도전율의 상대오차 비교 결과로써 캐패시터 모델은 L이 $0.6182mm$ 미만일 때만 안정되다할 수 있으며 MoM은 L이 $0.08904mm$ 미만일 때이다. 그러나 도전율도 실험한 범위 내에서 오차 10% 미만으로 안정되었다.

V. 결론

실제 측정상에 심각한 오차를 일으킬 수 있는 오차상황으로 측정매질의 표면이 거칠어서 프로브와 접촉이 완전히 안될 경우와 프로브 제작상의 오차로 내심이 움푹 들어간 경우를 선정하였다. 특히 1개의 공극을 측정매질 표면의 각기 다른 위치에 배열시킴으로써 공극의 위치에 따른 환산모델의 오차율을 비교하였다. 그리고 세 가지의 환산 모델로 각각 오차 상황에서의 환산을 하였다. 세 모델의 오차에 대한 안정성을 비교해 본 결과 여부를 확인하였다. 공극이 내심의 가장자리에 위치할 때 세 환산모델 모두 4~6%의 오차를 가졌으며 다른 위치에서보다 오차가 컸다. 따라서 실제 측정시에는 프로브가 접촉하는 부분 중 내심의 가장자리가 되는 곳의 접촉에 주의할 요함이 예측된다. 내심이 안으로 들어갔을 경우에는