

유전율/투자율 측정을 위한 2-PORT PROBE

박상복, 이장수, 천창을
서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부

Two-port probe for measuring the permittivity/permeability

Sangbok Park, Jangsoo Lee, Changul Cheon
Dept. of Electrical and Computer Eng., University of Seoul

Abstract - 본 연구에서는 2-port probe를 설계, 제작하고, 이를 이용하여 유전율과 투자율을 동시에 측정해내는 기법을 연구하였다. 기존에는 유전율 측정을 위해 끝이 open되어 있는 1-port probe를 주로 이용하였지만 이는 유전율만이 측정이 가능하고 주파수 대역에 한계가 있었다. 2-port probe는 유전율과 투자율이 동시에 측정이 가능하며 주파수의 한계를 극복하였다. 2-port probe를 등가화 하여 이를 수식적으로 해석했을 경우 수많은 변수들이 발생하는데 이것을 여러 수치기법들을 이용하여 정리한 후, 유전율을 알고 있는 용액들을 이용하여 보정하였다. 또한 2-port probe에 약간의 길이 변화를 주어 주파수대역의 변화를 실험을 통해 비교 분석하였다.

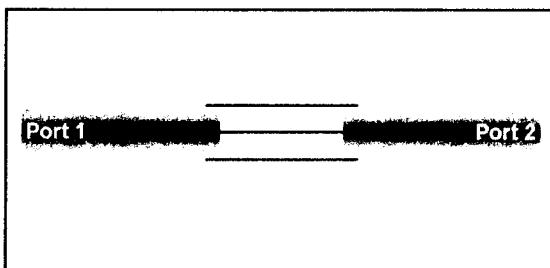
1. 서 론

현재 유전율 측정은 안테나 제작 및 분석 과정에서 매우 중요한 역할을 하고 있다. 안테나에서 방사되는 파는 통과되어지는 매질의 유전율 값에 매우 의존적이기 때문에 정확한 분석을 위해서 매질의 유전율 측정 과정은 필수적으로 존재하여야 한다. 그래서 지금까지도 유전율을 측정하고자 하는 기법들이 매년 소개되어지고 있다. 하지만 기존의 유전율 측정 방법들은 과정이 복잡하고 매우 제한적이어서 다소 불편한 점들이 많았다. 대표적으로 1-port probe의 경우 제작과정이 단순하고 유전율 값을 이끌어내는 과정이 비교적 간단하여 많이 사용되어지고 있다. 하지만 1-port probe 끝단의 물질과 접촉되는 부분에서의 필드가 나가는 정도가 커패시티브한 성분의 크기에 좌우되는데 주파수를 낮출 경우 필드가 밖으로 많이 나가게 되어 저주파에서의 유전율 측정은 불가능하게 된다. 이외에도 고주파에서의 특성, 주파수영역 등의 여러 단점들은 2-port probe의 data와 비교, 분석을 하려 한다.

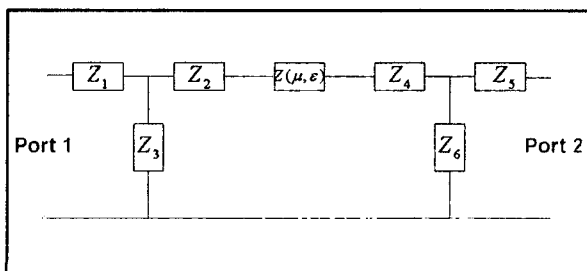
2. 본 론

2.1 2-port probe 제작 및 등가 회로 구성

2-port probe 제작에 앞서 고려된 사항은 측정하고자 하는 물질의 접촉이 용이하도록 전송선로 일부의 유전체를 제거하여 측정물질과 직접적으로 접촉이 용이하도록 만들었다. 또한 Field가 방사되는 것을 막기 위해 그림 1과 같이 양쪽 PORT의 ground를 2개의 Line을 이용하여 서로 이어주었다.



〈그림 1〉 측정하고자 하는 물질과의 접촉이 용이하도록 전송선로(coaxial line)의 일부의 유전체를 제거한 2-PORT PROBE



〈그림 2〉 제작된 2-PORT PROBE 등가 회로 구성

제작된 2-port probe는 반사/투과 계수 이론을 이용하면 단순한 수식전계를 통해 Signal Line과 접촉된 물질의 유전율과 투자율 측정이 가능하다[1]. 하지만 이는 이론적으로는 가능할지라도 실제 측정에서는 비효율적이다. 특히 본 연구에서 제작한 2-port probe는 물질과의 접촉이 용이하도록 만든 부분의 Ground가 2개의 Line에만 의존하고 실제 제작과정 중의 오차가 있기 때문에 순수하게 이론에만 치우쳐서는 올바른 결과를 얻기 힘들다. 그래서 보정 과정이 필요하다.

보정 과정을 위해서 2-port probe를 그림 2와 같이 등가 회로를 구성하였다. 유전체와 측정 물질과 접촉된 부분을 T-등가회로로 구성하고 나머지 부분들은 Transmission Line으로 구성하였다. 그림은 좌우가 대칭인 것처럼 보이지만 실제 제작 시 대칭일 수 없기 때문에 행렬로 표현할 때 변수를 서로 다르게 구성해 줘야한다. 유전체가 남아 있는 Coaxial Line은 손실이 없다고 가정하여 길이는 고려되지 않아도 된다. 물론 실제적으로는 어느 정도의 손실이 있겠지만 결과에는 크게 영향을 미치지 않는다.

그림 2의 등가 회로를 ABCD 행렬로 표현하면 식(1)과 같다. 보정 과정은 식(1)을 전개한 후 미지수를 구하는 과정이 될 것이다.

$$\begin{pmatrix} 1 + \frac{Z_1}{Z_3} & Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 Z_2}{Z_3} \\ \frac{1}{Z_3} & 1 + \frac{Z_2}{Z_3} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cosh(\gamma u) & jZ_e \sinh(\gamma u) \\ jY_e \sinh(\gamma u) & \cosh(\gamma u) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 + \frac{Z_4}{Z_6} & Z_4 + Z_5 + \frac{Z_4 Z_5}{Z_6} \\ \frac{1}{Z_6} & 1 + \frac{Z_5}{Z_6} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \quad (1)$$

2.2 측정 보정 과정

식(1)은 식(2)와 같이 변수를 줄일 수 있다.

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cosh(\gamma u) & jZ_e \sinh(\gamma u) \\ jY_e \sinh(\gamma u) & \cosh(\gamma u) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e & f \\ g & h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \quad (2)$$

유전체가 제거된 부분의 길이는 l 이라고 하고, 상수 p 와 l 의 곱을 u 라 하였다. p ($1 \leq p \leq 10$)는 수많은 실험 과정에서 나온 상수로서 결과 값을 안정화 시키는 역할을 한다. 물론 p 를 무시해도 실험 결과에는 그다지 크게 영향을 주지 않으며, 주파수와 주파수대역이 커짐에 따라 p 는 1에 수렴한다. 식(2)의 ABCD 행렬에서 A만을 전개하여 보면,

$$ae \times \cosh(\gamma u) + \frac{jbe}{Z_e} \times \sinh(\gamma u) + jag \times Z_e \times \sinh(\gamma u) + bg \times \cosh(\gamma u) = A \quad (3)$$

식(3)은 투자율과 유전율에 관한 식으로 간략화 될 수 있다.

$$a' \cosh\left(\sqrt{\mu_r \epsilon_r} \frac{\omega u}{c}\right) + \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}}} b' \sinh\left(\sqrt{\mu_r \epsilon_r} \frac{\omega u}{c}\right) + \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} c' \sinh\left(\sqrt{\mu_r \epsilon_r} \frac{\omega u}{c}\right) = A \quad (4)$$

식(4)의 미지수 3개는 식(5) 콜-콜(cole-cole)식에 의해 얻어진 세 가지 용액(공기, 메탄올, 증류수)의 유전율 값과 측정을 통해 얻어진 값을 가지고 연립방정식을 통해 구해질 수 있다. 물론 투자율 값은 1이다.

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_0 - \epsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau)^{1-\alpha}} - j\frac{\sigma}{\omega\epsilon_0} \quad (5)$$

ϵ_s 는 특성 주파수 f_c 보다 낮은 저주파수에서의 값(optical permittivity)이고, ϵ_∞ 는 특성 주파수보다 아주 높은 고주파수에서의 값(static permittivity)이다. τ 는 이완(relaxation) 시간, α 는 분산(distribution)변수, σ 는 용액의 이온의 전도율이다. 위의 콜-콜 변수는 온도와 주파수의 함수로서 오래전부터 연구되어 왔으며 값들이 테이블로 정리되어 있다. 본 논문에서 사용한 콜-콜 변수의 값들은 <표 1>에 작성했다.

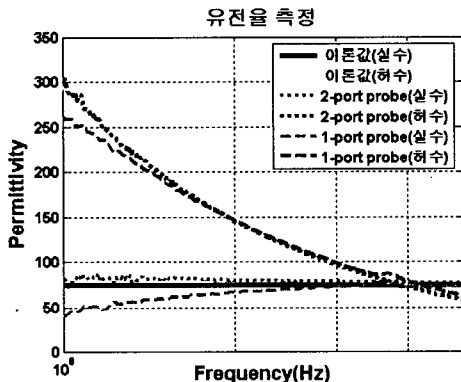
<표 1> 콜-콜 변수

Reference liquid	Cole-Cole parameter				
	ϵ_s	ϵ_∞	τ (ps)	α	σ (S/m)
Water	78.3	4.5	8.12	0.02	0
Methanol	33.7	4.5	49.64	0.043	0
0.5% saline	76.6	4.5	8.11	0.02	0.87
0.9% saline	75.3	4.5	8.1	0.02	1.55

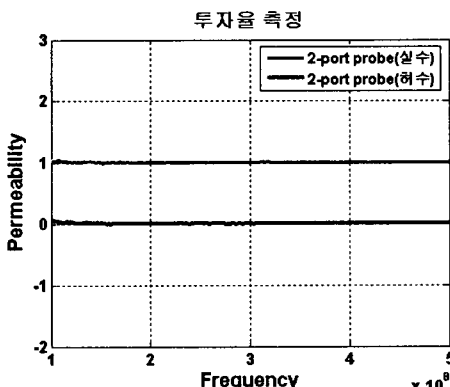
<표 1> 섭씨 25도에서 문헌상 보정 용액의 콜-콜 변수[2]

ABCD 행렬의 B와 C도 A를 구한 방식과 똑같이 구한다. 모든 변수가 구해진 후 측정하고자 하는 물질을 2-port probe를 가지고 측정하면 변수는 투자율과 유전율만이 남게 된다. 결국 투자율과 유전율이 모두 구해지는 것이다.

2.3 유전율/투자율 측정



<그림 3> 저주파 대역(100MHz~500MHz, log scale)에서의 2-port probe와 1-port probe와의 유전율 측정 비교(윗선 : 허수) Reference material - 0.9% 식염수



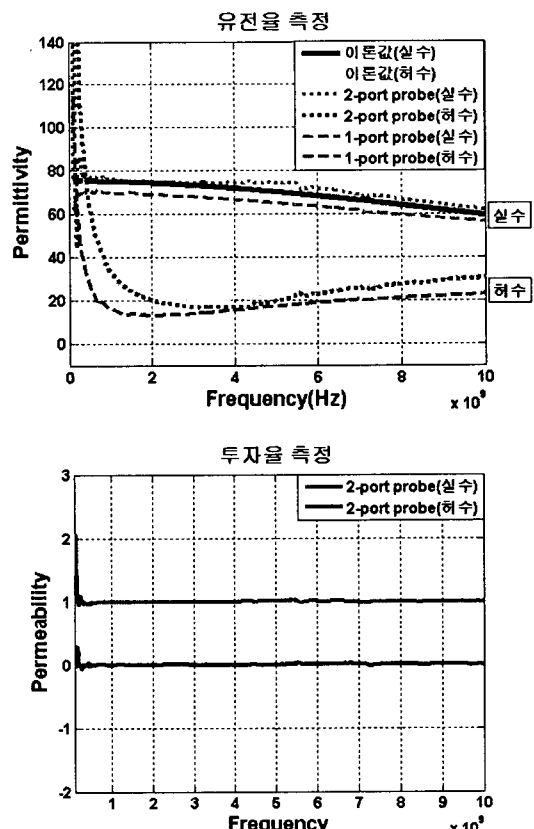
<그림 4> 저주파 대역(100MHz~500MHz)에서의 2-port probe 투자율 측정 Reference material - 0.9% 식염수

유전율/투자율 측정은 주위 환경에 매우 민감하기 때문에 측정 시 매우 신중하게 실험에 임해야 한다. 특히 온도에도 매우 의존적이다. 측정에 쓰인 probe는 하나의 probe(직경 : 1.20mm, 측정물질과 접촉되는 부분의 길이 : 2mm)이다. 본 연구에서는 유전율/투자율 측정이 저주파에서 가능하며 주

파수 대역의 광범위함을 보이고, 또한 1-port probe와의 비교를 통해 개선된 점을 강조하고자 한다. 먼저 그림 3에서 저주파 대역에서의 2-port probe의 정확성을 보여주고 있다. 측정은 VNA HP8753D(30KHz ~ 6G)를 이용하였다. Reference 물질로서 0.9% 식염수를 사용하였다. 1-port probe의 유전율 값은 300MHz 근처 Reference 값에서부터 그 이하 주파수로 갈수록 점점 벗어나는 것을 알 수 있다. 그에 반해 2-port probe의 유전율 값은 이론값을 잘 따라가고 있으며, 동시에 투자율도 측정되고 있다. 물론 그 이하의 주파수에서도 측정이 잘 되었으며, 다만 유한한 용기에 용액을 담아 측정하기 때문에 측정 시 생기는 reflection effect로 인해 약간의 진동이 발생되었다. 하지만 이론값과의 차이는 현재의 주파수에서 크게 차이는 없었다. 하지만 더욱 아래로 내려가면 효과가 어느 정도 크게 나타난다. 이는 더욱 큰 용기를 사용함으로써 어느 정도 해결될 수 있다.

2-port probe의 직경(D)과 측정물질과 접촉되는 부분의 길이(L) 변화를 주어 측정해본 결과 D가 커짐에 따라 L이 길어짐에 따라 저주파 대역에서 좋은 특성을 보였다. 물론 L이 너무 길어지면 그만큼 손실이 크게 생기기 때문에 고주파 대역에서 좋은 특성을 기대하기가 힘들다. 이는 probe의 주파수 대역을 줄이는 역효과를 낳게 된다.

그림 5는 2-port probe의 광대역 특성을 보이기 위한 것이다. 실험은 VNA HP8510C(45MHz ~ 50GHz)를 이용하였으며, 측정은 100m에서 10G까지 측정하였다. 가장자리 부분은 VNA의 특성상 나타난 오차이다.



<그림 5> 광대역(100MHz~10GHz)에서의 2-port probe 유전율/투자율 측정 Reference material - 0.9% 식염수

3. 결 론

유전율/투자율 측정은 데이터 분석에 필요한 중요한 과정이다. 주위의 모든 물질은 유전율/투자율로서 모두 해석될 수 있듯이 이것들을 알면 그만큼 해석하는데 많은 도움이 된다. 본 연구에서 제작한 2-port probe는 액체로 된 물질과 soft한 고체정도의 측정이 가능하다. 그러나 딱딱한 물질은 probe의 특성상 측정이 어렵다. 이는 앞으로 개선되어야 할 문제이며 이런 문제가 개선된다면 매우 강력한 유전율/투자율 측정 도구가 될 것이다.

[참고 문헌]

- [1] Jing Shenhui, Ding Ding and Jiang Quanxing, "Measurement of electromagnetic properties of materials using transmission / reflection method in a coaxial line", Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics, pp.590-595, 2003.
- [2] A. Nyshadham, C.L. Sibbald and S.S. Stuchly, "Permittivity measurements using open-ended sensors and reference liquid calibration - An uncertainty analysis", IEEE Trans. MTT, Vol. 40, pp. 305-313, 1992.