

# 동축 슬롯 선로를 이용한 기준 용액들의 이동 통신 주파수대에서의 복소 유전율 측정

## Complex Permittivity Measurement using a Coaxial Slotted Line of Reference Liquids at Mobile Communication Frequencies

김 정 호 · 김 윤 명\*

Jeong-Ho Kim · Youn-Myoung Gimm\*

### 요 약

본 논문에서는 이동 가능한 프로브(probe)가 있는, 종단된 동축 슬롯 선로(Coaxial slotted line)를 샘플 液의 홀더로 사용하여, 이동 통신 단말기의 송신 주파수대에서의 복소 유전율을 측정할 수 있는 시스템을 제작하였으며, 이를 이용하여 IEEE Std 1528-200X에서 제안한 기준 액체들(Reference Liquids)의 복소 유전율을 측정 비교하여 봄으로써, 측정 시스템의 타당성을 조사하였다.

### Abstract

In this paper, complex permittivities of reference liquids were measured by a sample holder of terminated slotted coaxial line with a movable probe at mobile communications frequencies. The validity of the liquid measurement system was checked by experimental tests with the reference liquids proposed in IEEE Std 1528-200X.

Key words : Complex Permittivity Measurement of Liquids, Slotted Coaxial Line

### I. 서 론

개인용 무선 이동 통신이 대중화됨에 따라, 전송 장비에서 복사되는 전자파의 인체노출에 대한 관심이 고조되고 있으며, 사회적 문제로 대두되고 있다. 세계 여러 나라에서는 전자파의 인체 노출에 대한 인체 안전기준을 제정하여 규제하고 있는 추세이며, 이에 맞추어 신체 내부에 존재하는 전자기장 량을 측정하는 시스템이 개발되었다<sup>[1]</sup>.

전자파 에너지 비흡수율(Specific Absorption Rate, SAR)은 단위 시간당, 단위 질량 당 흡수되는 전력 (W/kg)으로 표시되는 량으로서, 유전체의 밀도와 전기 전도도 그리고 전기장 등의 물리량에 의해 정의

된다.

$$SAR = \frac{d}{dt} \left( \frac{dW}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left( \frac{dW}{\rho dV} \right), \text{ 또는}$$

$$SAR = C \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{\sigma |E|^2}{\rho} [W/kg]$$

여기서, C는 열용량 [J/kg°C], |E|는 전기장의 세기 (rms) [V/m], σ는 전기 傳導度 [S/m], ρ는 비중 [kg/m<sup>3</sup>] 그리고 ΔT [°C]는 Δt [s] 시간 동안 일어난 온도의 변화이다.

SAR 검출은 저 손실 유전체의 고체 표피로 된 phantom 속에 모의 조직 용액(simulated tissue)을 채워서 시행한다.

모의 조직에서의 SAR을 측정하기 전에, 그것의

단국대학교 대학원 전자컴퓨터 공학부(Graduate School of Electronics and Computer Engineering, Dankook University)

\*단국대학교 전기전자컴퓨터 공학부 및 (주)EMF Safety(School of Electrical, Electronics and Computer Engineering, Dankook University, and also EMF Safety Inc.)

· 논문 번호 : 20030524-10S

· 수정완료일자 : 2003년 7월 30일

전기적 특성, 즉 유전상수와 전도도가 적절하게 조성되었음을 확인하여, 시험 주파수에서 전기적으로 실제 인간의 특성을 가지도록 한다.

본 논문에서는 이동 가능한 프로브(movable probe)가 있는, 종단된 동축 슬롯 선로(terminated coaxial slotted line)를 샘플 液의 홀더로 사용하여, 이동 통신 주파수帶에서 복소 유전율을 측정할 수 있는 시스템을 제작하였고, IEEE에서 제안한 기준 액체들(Reference Liquids)의 복소 유전율을 측정하여 봄으로써, 측정 시스템의 타당성을 조사하였다.

## II. 모의 인체掖의 전기적 특성 측정

### 2-1 모의 조직 용액(Simulated Brain Tissue)

모의 용액은 특정 주파수 영역에서 인체 특정 부위 조직의 유전상수와 전도도를 재현시킨 것이며, IEEE Std 1528-200X에 용액의 구성 성분이 제시되어 있다(표 1)<sup>[2]</sup>.

### 2-2 액체의 유전을 및 도전을 측정 방법

조직 등가 재료의 유전 특성 측정을 위한 방법으로 세 가지 타입의 샘플 홀더가 사용되고 있다.

첫번째는 종단된 동축 슬롯 선로를 샘플 홀더로 사용하는 방법으로, 2 Ports Network Analyzer를 사용

표 1. 인체 두뇌의 조직을 위한 조성(성분:질량 %)  
Table 1. The component for human brain tissue (mass %).

Frequency (MHz)	835	1,800			
	Recipe1	Recp.2	Recp.3	Recp.4	Recp.5
Water	40.45	52.64	55.36	54.9	49.43
Sugar	57.0				
Salt	1.45	0.36	0.35	0.18	0.64
HEC	1.0				
Bactericide	0.1				0.5
DGBE		47	13.84	44.92	
Triton X 100			30.45		
Diacetin					49.43
Target value	$\epsilon'$	41.5	40		
	$\sigma$	0.9	1.4		

하여 슬롯 선로의 입력에서 고주파 신호를 제공 하고, 샘플로 송신되는 신호의 크기와 위상을 이동 가능한 프로브(probe)를 통해 슬롯의 위치의 함수로 나타내어 유전 특성을 측정 해석하는 방법이다<sup>[3]</sup>.

두번째는 종단이 개방된 프로브가 샘플과 접촉되도록 하여 반사계수( $S_{11}$ )를 측정함으로써 誘電 특성을 해석하는 방법이다.

세번째는 액체로 채워진 TEM 전송선의 복소 전송 계수( $S_{21}$ )를 측정하는 방법이 있다.

본 논문에서는 위에 제시된 방법중 첫 번째 방법 즉, 종단된 동축 슬롯 선로를 샘플 홀더로 사용하여, 이동 통신 주파수帶에서의 기준 용액의 전기적 특성을 측정하였다.

그림 1(a)와 1(b)에 프로브 위치에 따른 RF의 진폭과 위상의 변화를 측정하기 위한 동축 슬롯 선로의 개념도 및 제작된 측정 장비를 나타내었다.

실험에 사용된 슬롯 선로는 길이 334 mm, 外도체의 내경이  $b = 14$  mm, 內도체의 외경이  $a = 6$  mm인 구리 파이프의 형태로, 이 선로의 특성 임피던스는

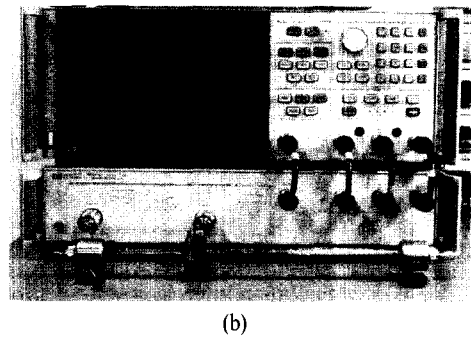
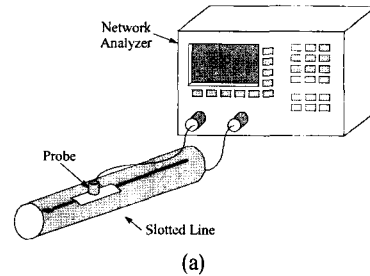


그림 1. 모의조직 용액의 전기적 특성을 측정하기 위해 사용된 장비의 개념도(a) 및 실물사진(b)  
Fig. 1. The conceptual diagram(a) of system for the electrical characteristic measurement of liquids and the real measurement system(b).

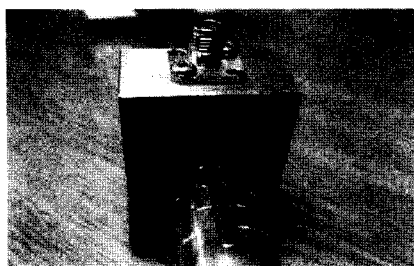


그림 2. 슬롯 선로의 프로브 홀더 부분  
Fig. 2. Probe holder of the slotted line.

$Z_0 = \sqrt{L/C} = (\eta_0/2\pi) \ln(b/a) = 50.84$  [ $\Omega$ ]이며, 이것의 외형을 그림 1(b)와 그림 2에 나타내었다.

### 2-3 모의 인체 액의 복소 유전율 측정 이론

복소 유전율  $\epsilon' - j\epsilon''$ , 투자율  $\mu$ , 도전율  $\sigma$  인 균일 매질 속에서 正弦波 파동 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla^2 \vec{E} + \omega^2 \mu \left( \epsilon' - j\epsilon'' - j \frac{\sigma}{\omega} \right) \vec{E} = \nabla^2 \vec{E} - \gamma^2 \vec{E} = 0$$

이 때, z축으로 전송되는 波의 해는 다음과 같다.

$$E(\rho, \varphi, z) = E^+(\rho, \varphi) e^{-\gamma z} + E^-(\rho, \varphi) e^{+\gamma z}$$

$E^+ e^{-\gamma z}$ 은 +z축 방향의 TEM波의 입사파이며,  $E^- e^{+\gamma z}$ 은 반사파인데, 동축선에서 모의 인체 액의 손실이 크다면, 반사파는 대부분 감쇄되므로 무시할 수 있다.

정의에 의해, 전파상수  $\gamma$ 는 다음과 같다.

$$\gamma^2 = (\alpha + j\beta)^2 = -\omega^2 \mu \left( \epsilon' - j\epsilon'' - j \frac{\sigma}{\omega} \right)$$

$$Re(\gamma^2) = \alpha^2 - \beta^2 = -\omega^2 \mu \epsilon' = -\omega^2 \mu \epsilon_r \epsilon_0$$

$$Im(\gamma^2) = 2\alpha\beta = \omega\mu(\omega\epsilon'' + \sigma) = \omega\mu\sigma_{effective}$$

일반적 손실 매질에 대한 比유전율(실수部)과 도전율은 다음과 같다.

$$\epsilon_r = \frac{\beta^2 - \alpha^2}{\omega^2 \mu \epsilon_0} \quad (1)$$

$$\sigma_{effective} = \frac{2\alpha\beta}{\omega\mu} \quad (2)$$

단,  $\alpha$  : 감쇄상수(attenuation constant) (Np/m)

$\beta$  : 위상상수(phase constant) (rad/m)

$\sigma_{effective}$  : 등가 전도도(equivalent conductivity) (S/m)

동축 슬롯의 한 지점에서 측정된 전압을  $V_1$ 이라 하고, 이 점으로부터  $\Delta z$  (m)만큼 떨어진 다른 지점에서 측정된 전압을  $V_2$ 라 하면,

$$|V_2| = |V_1| \exp(-\alpha \Delta z) \text{ 이므로,}$$

$$\alpha \text{ (Np/m)} = -\ln |V_2/V_1| / \Delta z \quad (3)$$

회로망 분석기로 측정되는  $\alpha$ 와  $\beta$ 의 데이터는 각각 dB/cm와 deg/cm 단위이므로, Np/cm와 rad/cm로 각각 변환한다.

$$\alpha \text{ (Np/cm)} = \ln(10) \cdot \alpha \text{ (dB/cm)} / 20 \quad (4)$$

$$\beta \text{ (rad/cm)} = \beta \text{ (deg/cm)} \cdot \pi / 180 \text{ (rad/deg)} \quad (5)$$

$\alpha$  (Np/cm)와  $\beta$  (rad/cm)는 각각 100배 곱해져서  $\alpha$  (Np/m)와  $\beta$  (rad/m)가 구해지며, 이들이 각각 식 (1)과 (2)에 대입된다.

측정 데이터의 크기와 위상은, 슬롯 선로 상의 총 11 지점에서 주파수에 따라 1 cm 또는 0.5 cm 단위로, 10 cm 또는 5 cm 구간에서 측정하였다.  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 5 cm 또는 2.5 cm 떨어진 두 점의 크기 기울기 및 위상변화의 평균으로 하자. 11지점에서는 6쌍의 크기 기울기 및 위상변화가 측정된다. 이것을 식 (6)과 (7)에 각각 나타내었다.

$$\alpha_{avg} \text{ (dB/cm)} = \left| \sum_{n=1}^6 \frac{dB_{n+5} - dB_n}{5 \text{ or } 2.5 \text{ cm}} \right| / 6 \quad (6)$$

$$\beta_{avg} \text{ (deg/cm)} = \left| \sum_{n=1}^6 \frac{\text{deg}_{n+5} - \text{deg}_n}{5 \text{ or } 2.5 \text{ cm}} \right| / 6 \quad (7)$$

이들을 식 (1)과 (2)에 대입하면, 일반적 손실 매질에서  $\epsilon_r$ 과  $\sigma_{effective}$ 의 값을 계산할 수 있다.

### III. 기준液들의 복소 유전율 특성 측정

IEEE Std 1528-200X에서 제안한 4가지 기준이 되는 액들(methanol, DMS, DI water, ethanediol)중에서 비교적 구하기 쉬우며, 측정 주파수에서 인체의 유전율과 도전율이 비슷한 methanol을 이용하였으며, 증류수(蒸溜水)도 참고삼아 측정하여 보았다.

측정 환경의 온도는  $20.0 \pm 1^\circ \text{C}$ 이었으며, HP 8753C 회로망 분석기로  $S_{21}$ 을 측정하였다.

3-1 Methanol 99 % (측정 주파수: 835 MHz)

표 2. 각 측정점에서의 크기와 위상  
Table 2. Magnitude and phase measured at 11 points.

Point	Amplitude [dB]	Phase [°]
1	-27.69	89.26
2	-30.08	31.02
3	-30.82	-24.01
4	-32.25	-79.58
5	-33.27	-130.42
6	-34.83	177.41
7	-35.44	114.15
8	-36.22	67.64
9	-37.28	18.05
10	-38.17	-37.98
11	-39.08	-107.51

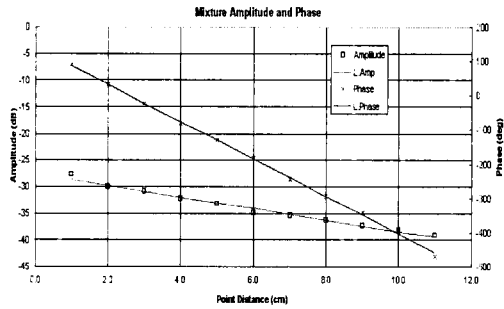


그림 3. 835 MHz에서 측정된 methanol 용액에서의 진폭과 위상 특성 그래프  
Fig. 3. Plots of amplitude and phase at 835 MHz on methanol filled slotted line.

측정 데이터를 그래프로 나타내면 그림 3과 같다.

•  $\epsilon_r$ 과  $\sigma_{effective}$ 의 값 계산

식 (6)~(7)를 이용해서  $\alpha_{avg}$ 와  $\beta_{avg}$ 가 구해진다.

$\alpha_{avg}$			$\beta_{avg}$		
dB/cm	Np/cm	Np/m	deg/cm	rad/cm	rad/m
1.08	0.124	12.4	54.497	0.951	95.1

식 (1)과 (2)로부터,  $\epsilon_r$ 과  $\sigma_{effective}$ 가 구해진다.

• IEEE Std 1528-200X 목표 값과의 비교

	측정치	목표치	목표치와의 차이
$\epsilon_r$	29.04	31.37	-7.44 (%)
$\sigma_{effective}$	0.36	0.35	2.51 (%)

표 3. 각 측정점에서의 크기와 위상  
Table 3. Magnitude and phase measured at 11 points.

Point	Amplitude [dB]	Phase [°]
1	-39.01	-45.91
2	-41.20	-102.71
3	-43.01	-164.74
4	-44.98	141.24
5	-46.98	87.72
6	-49.27	30.42
7	-51.53	-27.14
8	-53.42	-81.19
9	-55.37	-136.38
10	-57.45	167.10
11	-59.71	117.76

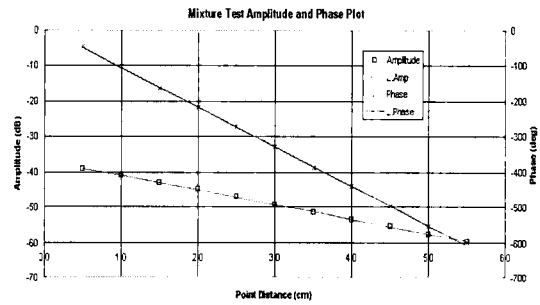


그림 4. 1,800 MHz에서 측정된 methanol 용액에서의 진폭과 위상 특성 그래프  
Fig. 4. Plots of amplitude and phase at 1,800 MHz on methanol filled slotted line.

측정치는 목표치와 5% 이상의 측정오차가 생겼으며, 동축 슬롯 선로의 구조적 특성으로부터 발생한 반사파가 입사파에 더해져, 그림 3의 진폭에서 미세한 定在波가 발생하였다.

3-2 Methanol 99%(측정 주파수: 1,800 MHz)

측정 데이터를 그래프로 나타내면 그림 4와 같다.

•  $\epsilon_r$ 과  $\sigma_{effective}$ 의 값 계산

$\alpha_{avg}$			$\beta_{avg}$		
dB/cm	Np/cm	Np/m	deg/cm	rad/cm	rad/m
4.127	0.475	45.7	111.583	1.947	194.7

• IEEE Std 1528-200X 목표 값과의 비교

동축 슬롯 선로를 이용한 기준 용액들의 이동 통신 주파수대에서의 복소 유전율 측정

	측정치	목표치	목표치와의 차이
$\epsilon_r$	25.1	25.5	-1.75 (%)
$\sigma_{effective}$	1.30	1.27	2.55 (%)

측정치가 목표치와 거의 접근하였으며, 定在波가 발생되지 않았다.

### 3-3 증류수(측정 주파수: 835 MHz)

- 각 측정 점에서의 크기와 위상(그림 5)
- IEEE Std 1528-200X 목표 값과의 비교

	측정치	목표치	목표치와의 차이
$\epsilon_r$	77.8	80.0	-2.80 (%)
$\sigma_{effective}$	0.20	0.17	19.34 (%)

도전율이 목표치와 5 % 이상의 오차가 생겼으며, 定在波가 관측되었다.

### 3-4 증류수(측정 주파수: 1,800 MHz)

- 각 측정 점에서의 크기와 위상(그림 6)
- IEEE Std 1528-200X 목표 값과의 비교

	측정치	목표치	목표치와의 차이
$\epsilon_r$	79.1	79.4	-0.32 (%)
$\sigma_{effective}$	0.83	0.78	6.17 (%)

도전율이 835 MHz에 비해 목표치와 많이 근접하였지만, 여전히 5 % 이상의 오차가 생겼으며, 定在波도 관측되었다.

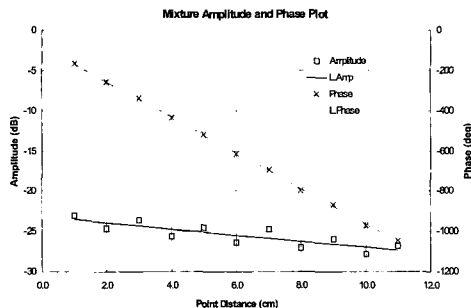


그림 5. 835 MHz에서 측정된 증류수에서의 진폭과 위상 특성 그래프

Fig. 5. Plots of amplitude and phase at 835 MHz on DI water filled slotted line.

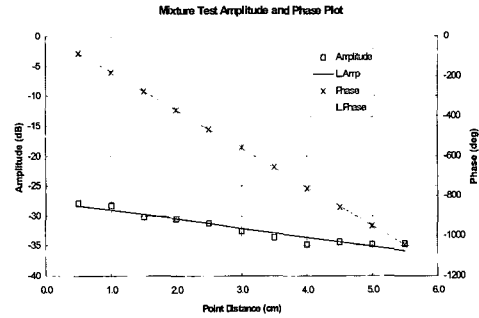


그림 6. 1,800 MHz에서 측정된 증류수에서의 진폭과 위상 특성 그래프

Fig. 6. Plots of amplitude and phase at 1,800 MHz on DI water filled slotted line.

## IV. 결 론

본 논문에서는, 중단된 동축 슬롯 선로를 샘플의 홀더로 사용하여, 무선 통신 주파수대에서 기준 액체들(methanol 및 증류수)의 복소 유전율을 측정하였다.

methanol의 경우, 1,800 MHz에서 측정치와 목표치가 거의 근접하였다. 이것은 이 주파수에서 methanol의 손실이 크기 때문인 것으로 생각된다.

증류수의 경우, 두 측정 주파수 모두에서 거리에 따른 진폭의 定在波가 관측되었다. 이는 동축 선로의 슬롯이 끝나는 지점에서 발생한 반사파가 증류수의 낮은 감쇠 특성 때문에 감쇠되지 않고 입사파에 더해졌기 때문이라 생각된다. 손실이 적은 증류수가 이 시스템을 이용하여 측정하기에는 적당하지 않음을 알 수 있었다. 따라서 낮은 손실의 액을 측정하기 위해서는 슬롯의 길이를 더 길게 하고, 슬롯의 폭을 줄여야 할 필요가 있었다.

본 논문에서 측정한 모든 경우에서 도전율이 목표치보다 큼을 알 수 있다. 손실이 적은 증류수의 경우는 손실이 큰 methanol 보다 더 그러했다. 이는 슬롯을 통한 복사 손실과 선로内的 저항손실 때문에, 슬롯 폭이 좁고 저항 손실이 적은 이상적인 경우보다 측정된  $\alpha$ 가 더 크게 관측된 것 같기 때문이다. 따라서 슬롯의 틈을 더 줄이고 동축 선로의 内外도 체 굵기를 더 굵게 하는 것이 필요함을 알게 되었다.

슬롯 밖으로 새어나간 場에 의해서 위상상수  $\beta$ 는 슬롯 폭이 좁은 이상적인 경우보다 다소 감소함을 생각할 수 있다. 따라서 증가된  $\alpha$ 와 더불어, 감

소된  $\beta$ 는 측정된  $\epsilon_r$ 이 목표치보다 항상 작게 나오는 것으로 식 (1)에 의해서 추정할 수 있다.

상대적으로 높은 손실을 갖는 1,800 MHz에서 methanol은 목표치와 측정치가 매우 근접하였으며, 이 주파수에서 인체 두뇌 용액과 같이, methanol 보다 더 많은 손실을 갖는 물질의 경우, 저자들이 제작한 이러한 슬롯 선로 측정 시스템의 구조는 시험 액체의 목표치(target value)에 더욱 더 근접한 값을 갖게 할 수 있음을 알 수 있었다.

### 참 고 문 헌

[1] Q. Balzano, O. Garay and T. Manning, "Electromagnetic energy exposure of the users of portable cellular telephones", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 44, no. 3, pp. 390-403, Aug. 1995.  
 [2] IEEE Std 1528-200X(Draft CD 1.0-Sep. 15, 2002) DRAFT Recommended Practice for Determining the

Peak Spatial-Average Specific Absorption Rate in the Human Body due to Wireless Communication Devices: Experimental Techniques, *IEEE Standard Coordinating Committee 34*.

[3] C. K. Chou, G. W. Chen, A. W. Guy and K. H. Luk, "Formulas for preparing phantom muscle tissue at various radiofrequencies", *Bioelectromagnetics*, vol. 5, pp. 435-441, 1984.  
 [4] C. Gabriel, T. Y. A. Chan and E. H. Grant, "Admittance models for open ended coaxial probes and their place in dielectric spectroscopy", *Physics in Medicine and Biology*, vol. 39, no. 12, pp. 2183-2200, 1994.  
 [5] U. Kaatz, "Complex permittivity of water as function of frequency and temperature", *Journal of Chemical and Engineering Data*, vol. 34, no. 4, pp. 371-374, 1989.

### 김 정 호



1992년: 단국대학교 전자공학과 (공학석사)  
 1992년~1996년: 대우전자 VCR 연구소 주임연구원  
 1996년~현재: 인천기능대학 전자과 조교수  
 1997년~현재: 단국대학교 전자공

학과 박사과정

[주 관심분야] 전자파 인체 영향, 전자파 환경 측정

### 김 윤 명



1977년 2월 22일: 한국과학원 전기 및 전자공학과 (공학석사)  
 1990년 8월 17일: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)  
 1980~현재: 단국대학교 공과대학 전기전자컴퓨터공학부 교수  
 2000년 6월~현재: (주)EMF Safety

대표이사

[주 관심분야] 전자파 인체 영향, 전자파 환경 측정