

# 전자파 비흡수율(SAR) 측정용 인체 두뇌 모의 용액의 복소 비유전율 측정

김 정호\*, 김 윤명\*

단국대학교 대학원 전자·컴퓨터 공학 전공°, (주) EMF Safety\*

전화 : 02-709-2585 / 핸드폰 : 017-201-4935

## Complex Permittivity Measurement of Simulated Brain Tissue for the Evaluation of Specific Absorption Rate(SAR)

Jeong-Ho Kim°, Youn-Myoung Gimm°

Graduate School, Dankook University°, EMF Safety Inc.\*

E-mail : gimm @ dku.edu

### Abstract

Complex permittivities of human head simulating liquids were measured by a sample holder of terminated slotted coaxial line with a movable probe at mobile communication frequencies. The validity of the liquid measurement system was checked by experiments with the reference liquids. Liquids of ingredients for human brain suggested in IEEE draft and those made by the authors were measured by this slotted line system.

### I. 서론

개인용 무선 이동 통신이 대중화됨에 따라, 장비에서 복사되는 전자파의 인체노출에 관심이 고조되고 있다. 이에 맞추어 신체 내부에 존재하는 전자기장 밀을 측정하는 시스템이 개발되었다.<sup>[1]</sup>

전자파 에너지 비흡수율(SAR, Specific Absorption Rate)은 단위 시간당, 단위 질량당 흡수되는 전력(W/kg)으로 표시되는 양으로서, 유전체의 밀도와 전기 전도도 그리고 전기장 등의 물리량에 의해 정의된다.

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

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

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

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

모의 조직에서의 SAR을 측정하기 전에, 그것의 전기적 특성, 즉 유전상수와 전도도가 적절하게 조성되었음을 확인하여, 시험 주파수에서 전기적으로 실제 인간의 특성을 가지도록 한다.

본 논문에서는 이동 가능한 프로브(probe)가 있는, 중단된 동축 슬롯 선로(coaxial slotted line)를 모의 액체 샘플의 홀더로 사용하여, 이동통신 주파수帶에서, 기준 液과 SAR 측정을 위한 인체 두뇌 모의 용액의 복소 유전율을 측정하였다. IEEE Draft 1528-200X<sup>[2]</sup>에서는 모의 용액의 물질 조성비를 제시하였는데, SAR 측정의 편의상 용액의 특정 성분 비율을 변경하여 제조하고, 이들에 대한 측정을 통해서 액체 용액의 변경된 조성비의 타당성을 조사하였다.

### II. 모의 인체液의 전기적 특성 측정

#### 2.1 모의 두뇌 조직 용액

모의용액은 특정 주파수 영역에서 인체 특정 부위 조직의 유전상수와 전도도를 재현시킨 것이며, IEEE

Std 1528-200X에 용액의 구성 성분이 제시되었다.

표 1. 두뇌의 조직을 위한 조성 (성분 : 질량 %)

| Frequency<br>(MHz) | 835 MHz                   |             | 1,800 MHz |          |          |
|--------------------|---------------------------|-------------|-----------|----------|----------|
|                    | Recipe 1                  | Recipe 2    | Recipe 3  | Recipe 4 | Recipe 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 X100        |                           |             | 30.45     |          |          |
| Diacetin           |                           |             |           |          | 49.43    |
| Target<br>value    | $\epsilon_r'$<br>$\sigma$ | 41.5<br>0.9 | 40<br>1.4 |          |          |

### 2.2 액체의 유전을 및 도전을 측정 방법의 종류

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

첫번째는 이동 가능한 프로브(probe)를 가진 중단된 동축 슬롯 선로를 샘플 홀더로 사용하는 방법<sup>[3]</sup>,

두번째는 중단이 개방된 프로브가 샘플과 접촉하도록 하여 반사계수( $S_{11}$ )를 측정함으로써誘電특성을 해석하는 방법,

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

본 논문에서는 위에 제시된 방법중 첫 번째 방법을 이용하여, 모의 인체 용액 및 기준용액의 전기적 특성을 각각 측정하였다.

그림 1a와 1b에 프로브 위치에 따른 RF의 진폭과 위상의 변화를 측정하기 위한 동축 슬롯 선로의 개념도 및 제작된 측정 장비를 나타내었다.

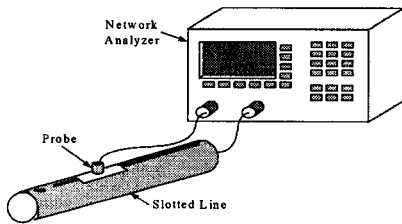


그림 1a



그림 1b

그림 1. 모의조직 용액의 전기적 특성을 측정하기 위해 사용된 장비의 개념도(1a) 및 사진(1b)

실험에 사용된 슬롯 선로는 길이 334 mm, 外도체의 내경이  $b=14$  mm, 內도체의 외경이  $a=6$  mm인 구리 파이프의 형태로<sup>[4]</sup>, 이 선로의 특성 임피던스는

$$Z_0 = \sqrt{L/C} = (\eta_0 / 2\pi) \ln(b/a) = 50.84 \Omega \text{이다.}$$

이것의 외형을 그림 1b 과 2에 나타내었다.

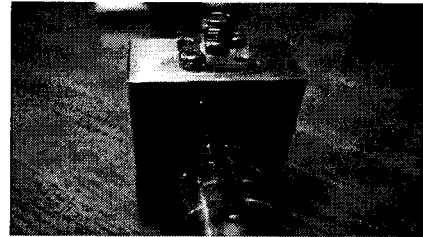


그림 2. 제작된 슬롯 선로의 Probe 홀더 부분

### 2.3 모의 인체液의 복소 유전을 측정 이론

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

$$\nabla^2 \vec{E} + \omega^2 \mu \left( \epsilon' - j\epsilon'' - j \frac{\sigma}{\omega} \right) \vec{E} = \nabla^2 \vec{E} - \gamma^2 \vec{E} = 0 \quad (1)$$

위 식에서 z축으로 전송되는 波의 해는 다음과 같다.

$$E(\rho, \phi, z) = E^+(\rho, \phi)e^{-\gamma z} + E^-(\rho, \phi)e^{+\gamma z} \quad (2)$$

$E^+e^{-\gamma z}$ 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 같이 쓸 수 있다.

$$\gamma^2 = (\alpha + j\beta)^2 = -\omega^2 \mu \left( \epsilon' - j\epsilon'' - j \frac{\sigma}{\omega} \right) \quad (3)$$

$$\text{Re}(\gamma^2) = \alpha^2 - \beta^2 = -\omega^2 \mu \epsilon' = -\omega^2 \mu \epsilon_r \epsilon_0 \quad (4.1)$$

$$\text{Im}(\gamma^2) = 2\alpha\beta = \omega\mu(\omega\epsilon'' + \sigma) = \omega\mu\sigma_{\text{effective}} \quad (4.2)$$

일반적 손실 매질에 대한 비유전율(실수部)과 도전율은 다음과 같다.

$$\epsilon_r = \frac{\beta^2 - \alpha^2}{\omega^2 \mu \epsilon_0} \quad (5.1), \quad \sigma_{\text{effective}} = \frac{2\alpha\beta}{\omega\mu} \quad (5.2)$$

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

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

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

$$\alpha (Np/m) = -\ln |V_2/V_1| / \Delta z \quad (6)$$

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

$$\alpha (Np/cm) = \ln(10) \cdot \alpha (dB/cm) / 20 \quad (7.1)$$

$$\beta (rad/cm) = \beta (deg/cm) \cdot \pi / 180 (rad/deg) \quad (7.2)$$

$\alpha$  (Np/cm)와  $\beta$  (rad/cm)은 각각 100배 곱해서  $\alpha$  (Np/m)와  $\beta$  (rad/m)가 구해지며, 이들이 식 (5)들에 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 위상 변화의 평균으로 하자. 11지점에서는 6쌍의 크기 기울기 및 위상 변화가 측정된다. 이것을 식 (8.1) 과 (8.2) 에 각각 나타내었다.

$$\alpha_{avg} (dB/cm) = \left| \sum_{n=1}^6 \frac{dB_{n+5} - dB_n}{5 \text{ or } 2.5 \text{ cm}} \right| / 6 \quad (8.1)$$

$$\beta_{avg} (deg/cm) = \left| \sum_{n=1}^6 \frac{deg_{n+5} - deg_n}{5 \text{ or } 2.5 \text{ cm}} \right| / 6 \quad (8.2)$$

이들을 식(5.1)과 (5.2)에 대입하면, 일반적 손실 매질에서  $\epsilon_r$  과  $\sigma_{effective}$  의 값을 계산할 수 있다.

### III. 모의 液들의 복소 유전율 특성 측정

IEEE Draft 1528-200X에서 제시한 인체 두뇌 모의 용액의 물질 조성비를 이용하여 만든 모의 용액과 SAR 측정의 편의를 위하여 용액의 특정 성분 비율을 변경하여 著者들이 제조한 용액들의 복소 유전율을 각각 835 MHz 및 1800 MHz에서 측정하였다.

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

#### 3.1 835 MHz에서 복소 유전율 측정

(1) IEEE의 조성 권고로 제조된 용액(표1의 Recipe 1)

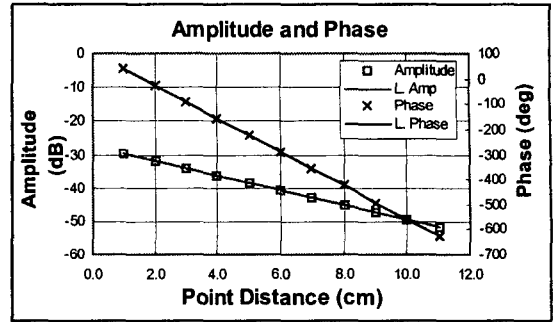


그림 3. 측정된 진폭과 위상 특성

•  $\alpha_{avg}$  와  $\beta_{avg}$ 의 값 계산

식 (8.1)-(8.2)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 |
| 2.22           | 0.255 | 25.5 | 66.92         | 1.168  | 116.8 |

• IEEE Std 1528-200X 목표 값과의 비교

식 (5-1)과 (5-2)로부터,  $\epsilon_r$  과  $\sigma_{effective}$  가 구해진다.

| 측정결과                 | 측정치  | 목표치  | 목표치와의 차이 |
|----------------------|------|------|----------|
| $\epsilon_r$         | 42.4 | 41.5 | 2.21 (%) |
| $\sigma_{effective}$ | 0.90 | 0.90 | 0.51 (%) |

(2) 著者들이 조성 성분을 변경한 용액

표 2. 용액의 조성 성분 비

| Composition | Weight (gram) | % in weight |
|-------------|---------------|-------------|
| Water       | 8,090.0       | 40.76 %     |
| Sugar       | 11,400.0      | 57.43 %     |
| Alcohol     | 0.0           | 0.00 %      |
| Salt        | 280.0         | 1.41 %      |
| HEC         | 60.0          | 0.30 %      |
| Bactericide | 20.0          | 0.10 %      |

• 조성 변경 사유 : 용액의 구성 성분 중 설탕이 가라앉는 것을 막기 위한 본딩(bonding) 역할을 하는 HEC의 비율을 낮춤으로서 용액의 점도를 묽게 하여, 용액 관리 및 측정 편의를 도모하였다.

• 측정결과

| 측정결과                 | 측정치  | 목표치  | 목표치와의 차이 |
|----------------------|------|------|----------|
| $\epsilon_r$         | 41.7 | 41.5 | 0.59 (%) |
| $\sigma_{effective}$ | 0.91 | 0.90 | 1.54 (%) |

#### 3.2 1800 MHz에서 복소 유전율 측정

(1) IEEE의 조성 권고로 제조된 용액(표1의 Recipe 2)

| 측정결과                 | 측정치  | 목표치  | 목표치와의 차이  |
|----------------------|------|------|-----------|
| $\epsilon_r$         | 38.5 | 40.0 | -3.75 (%) |
| $\sigma_{effective}$ | 1.40 | 1.40 | 0.01 (%)  |

(2) 著者들이 조성 성분을 변경한 용액

표 1의 Recipe 3에 비해서 물의 성분을 높이고, DGBE의 비율을 줄였다.

표 3. 용액의 조성 성분 비

| Composition | Weight (gram) | % in weight |
|-------------|---------------|-------------|
| Water       | 12,000.0      | 59.73 %     |
| Sugar       | 0.0           | 0.00 %      |
| DGBE        | 2,000.0       | 9.96 %      |
| Salt        | 90.0          | 0.45 %      |
| HEC         | 0.0           | 0.00 %      |
| Triton X100 | 6,000.0       | 29.87 %     |

• 조성 변경 사유 : DGBE는 휘발성이 강하여 실내에서 실험 환경이 좋지 않으므로 이 성분을 줄여 휘발성을 낮추어서, 시간에 따른 용액의 특성 변화를 줄여 용액 판리를 용이하게 하였다.

• 측정결과

| 측정결과                 | 측정치  | 목표치  | 목표치와의 차이 |
|----------------------|------|------|----------|
| $\epsilon_r$         | 40.4 | 40.4 | 0.89 (%) |
| $\sigma_{effective}$ | 1.40 | 1.40 | 0.27 (%) |

IV. 기준액의 복소 유전율 특성 측정

IEEE Std 1528-200X에서 제안한 4가지 기준이 되는 액들(Methanol, DMS, DI water, Ethanediol)중에서 측정 주파수에서 인체의 유전율과 도전율이 비슷한 Methanol을 측정<sup>[5]</sup>하여 시스템의 타당성을 조사했다.

4.1 835 MHz에서 Methanol 측정

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

4.2 1800 MHz에서 Methanol 측정

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

IV. 결론

본 논문에서는, 종단된 동축 슬롯 선로를 사용하여, 모의 두뇌 용액 및 기준 액체(Methanol)의 전기적 특성을 측정하여 보았다.

Methanol의 경우, 835 MHz에서는 목표치와 5 % 이상의 측정 오차를 가지지만, 1800 MHz에서는 측정치와 목표치가 거의 근접하였다. 이것은 주파수에 따른 Methanol의 손실의 차이 때문인 것으로 생각된다.<sup>[4]</sup>

Methanol 보다 손실이 더 큰 모의 두뇌 용액의 경우, IEEE에서 제안한 용액과 성분 비율을 변경 제조한 용액 모두 실험치가 목표치에 근접하였다.

따라서 이러한 시스템을 이용한 측정 방법은 인체 모의 두뇌 용액의 복소 유전율을 측정하기 위한 적절한 방법으로 생각되며, 이 논문에서 성분 비율을 조정 한 용액도 인체 두뇌 용액으로 사용하기에 문제점이 없음을 알 수 있었다.

참고문헌

[1] Balzano, Q., Garay, O., and Manning, T., "Electromagnetic energy exposure of the users of portable cellular telephones," IEEE Trans. on Veh. Tech., 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.

[3] Chou, C. K., Chen, G. W., Guy, A. W., and Luk, K. H., "Formulas for preparing phantom muscle tissue at various radiofrequencies," Bioelectromagnetics, vol. 5, pp. 435-441, 1984.

[4] 김경호 외 "동축 슬롯 선로를 이용한 기준 용액들의 이동 통신 주파수帶에서의 복소 유전율 측정," 2003년도 춘계 마이크로파 및 電波通信 학술대회 논문집, 제26권, 제1호, pp. 643-646, 2003. 5. 24.

[5] Gabriel, C., Chan, T. Y. A., and Grant, E. H., "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.