

펄스 신호에 대한 전자파 인체흡수율(SAR) 측정 오차 분석 및 개선 방안 연구

권용기 · 최동근 · 류충상 · 김윤명*

방송통신위원회
국립전파연구원 · *단국대학교 전자전기공학과

I. 서 론

휴대전화의 전자파가 인체에 미치는 영향은 전자파 흡수율(SAR: Specific Absorption Rate)로 평가된다. 전자파 흡수율(SAR)이란 인체의 단위 질량에 단위 시간당 흡수되는 에너지를 말하는 것으로 [W/kg]의 단위를 이용한다. CW 신호를 이용하여 프로브를 교정한 SAR 측정 시스템은 WiFi, GSM 등 펄스 신호에 대하여 SAR 값을 측정할 때, 측정 오차가 발생하는 것으로 알려져 있다^{[1]~[3]}. 따라서 본 논문에서는 현재 국내에서 이용되고 있는 2개사의 상용 SAR 측정 시스템을 이용하여 펄스 신호에 대한 SAR 값을 측정하여 오차 발생 여부와 그 원인을 분석하고, 이러한 문제점을 해결할 수 있는 방안들을 제시하고자 한다.

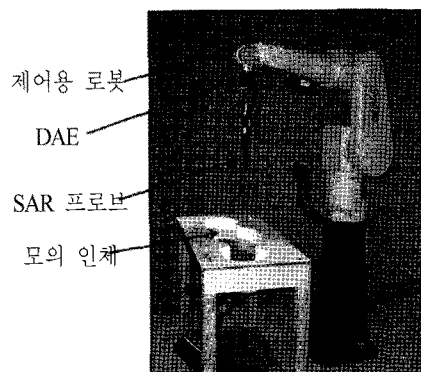
제2장에서는 SAR 측정 시스템에서 SAR 값을 측정·계산하는 과정을 간단히 기술한다. 그리고 여기서는 다이폴 센서의 민감도, 변환인자, 다이오드 압축점 등 SAR 프로브 교정에 필요한 인자들을 간단히 소개한다. 제3장에서는 2개사의 SAR 측정 시스템에 대하여 동일한 형태의 펄스 신호를 인가할 때 SAR 값 측정 결과를 각각 기술한다. 그리고 제4장에서는 펄스 신호에 대하여 SAR 측정 오차가 발생하는 원인을 분석하고, 이를 해결하기 위한 방안을 제시하며, 제5장에서는 결론을 기술한다.

II. SAR 측정 시스템

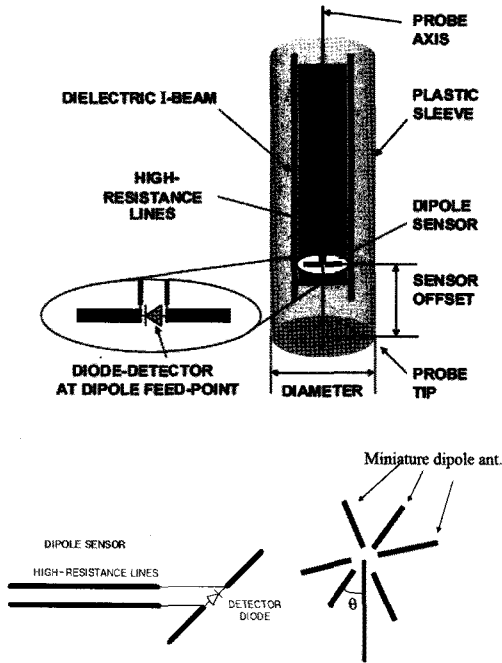
SAR 값을 측정하기 위한 SAR 측정용 시스템은

[그림 1]과 같이 SAR 측정용 프로브, 데이터 수집·처리장치(DAE), 컴퓨터, 제어용 로봇 및 모의 인체로 구성된다. 여기서 SAR 측정용 프로브는 전자파의 세기를 프로브에 유기되는 전압 형태로 측정하는 역할을 수행하며, 데이터 수집·처리 장치(DAE)는 SAR 프로브가 측정한 전압값에서 평균값을 산출하는 역할을 하며 컴퓨터는 DAE에서 전송된 전압값을 이용하여 SAR 값을 최종 산출하는 역할을 수행한다. 한편, 제어용 로봇은 SAR 프로브를 지정된 위치로 이동하는 역할을 하며 모의 인체는 인체와 유사한 전기적, 유전적, 외형적 특성을 제공한다.

SAR 측정용 시스템을 구성하는 요소들은 각각 고유의 역할을 수행하지만, 실제 SAR 값을 측정하는데 가장 기본이 되는 요소는 SAR 측정용 프로브이다. SAR 측정용 프로브는 [그림 2]와 같이 3개의 소형 다이폴 안테나, 검파 다이오드, 관련 전기 회로 및 출력



[그림 1] SAR 측정용 시스템



[그림 2] SAR 프로브 구조

부로 구성된다. 세 개의 소형 다이폴 안테나는 프로브 중심축에 대하여 동일한 위치에서 각각 54.73°가 기울어져 배열되어 있어 외부 전자기장에 대해 120°의 위상차를 가지고 외부의 전기장 세기를 측정한다.

휴대전화 전자파에 의한 SAR 값은 식 (1) 및 식 (2)의 계산 절차를 통하여 구해진다. SAR 값은 모의 인체 내에 유기된 전기장 세기를 측정하여 구할 수 있는데, 모의 인체 내에 형성된 전기장 세기는 다이폴 안테나에 유기되는 전압값으로 측정된다. 즉, 식 (2)와 같이 SAR 프로브에 유기된 전압을 측정하여 인체 내부에 유기된 전기장 세기를 구한 후, 이를 식 (1)에 입력함으로써 SAR 값을 구할 수 있다^[4].

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{\rho} \quad [W/kg] \quad (1)$$

$$|E|^2 = \sum_{i=1}^3 |E_i|^2 = \sum_{i=1}^3 \frac{f_i(V_i)}{\eta_i \gamma_i} \quad (2)$$

여기서 E 는 휴대전화 전자파로 인해 인체 내부에 유도된 전기장 세기[V/m], σ 는 인체 전기 전도도[S/m], ρ 는 인체 질량 밀도[kg/m³]를 나타낸다. 한편, E_i 는 i 축 방향으로의 전기장 세기, V_i 는 정류 신호, $f(v_i)$ 는 정류된 센서 신호 V_i 의 선형 함수이며, $V\eta_i$ 는 자유 공간에서의 다이폴 센서의 민감도 [$\mu V/(V/m)^2$], r_i 는 자유 공간에서의 프로브 센서의 민감도에 대한 매질 내의 프로브 센서의 민감도 비로서 변환 계수이다.

한편, 입력 전기장 세기가 높아짐에 따라, 프로브의 미소 다이폴에 유기되는 실제 전압은 예측되는 선형 출력 전압보다 낮은 전압(V_i)을 나타낸다. 따라서 식 (3)을 이용하여 실제보다 낮게 측정된 전압값을 보상(V_{comp})해 준다. 여기서, DCP(Diode Compression Point)는 다이오드 압축점이며, DF(Duty Factor)는 듀티 팩터로서 연속파는 1, 펄스 신호인 GSM 신호는 1/8.3을 적용한다^[4].

$$V_{comp} = f_i(V_i) = V_i + \frac{V_i^2}{DCP} \times \frac{1}{DF} \quad (3)$$

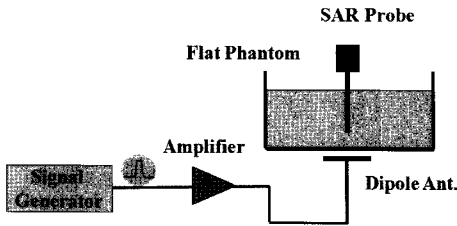
이때 SAR 프로브 특성 인자인 η_i , γ_i 및 DCP 값은 프로브를 교정할 때 통상 CW 신호를 입력하여 구한다.

III. 펄스 신호에 대한 SAR 값 측정

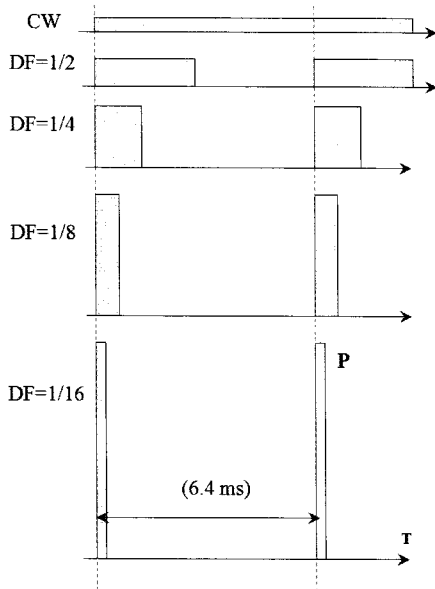
CW 신호를 이용하여 프로브를 교정한 SAR 측정 시스템은 WiFi, GSM 등 펄스 신호에 대하여 SAR 값을 측정할 때, 측정 오차가 발생하는 것으로 알려져 있다^[11-13]. 따라서 여기서는 2 종류의 상용 SAR 측정용 프로브에 대하여 펄스 신호에 대한 SAR 값을 측정하여 오차 발생 여부를 알아본다.

펄스 신호에 대한 SAR 측정 오차 발생 여부를 평가하기 위하여 [그림 3]과 같이 측정 시스템을 구성하였다.

신호 발생기와 증폭기, 다이폴 안테나를 이용하여 [그림 4]와 같은 1.8 GHz 연속파(DF=1)와 일정한 펄



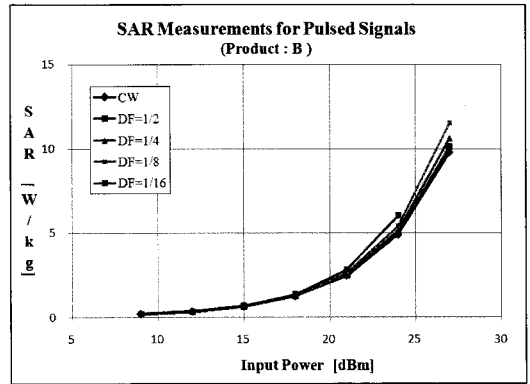
[그림 3] 측정 시스템 구성도



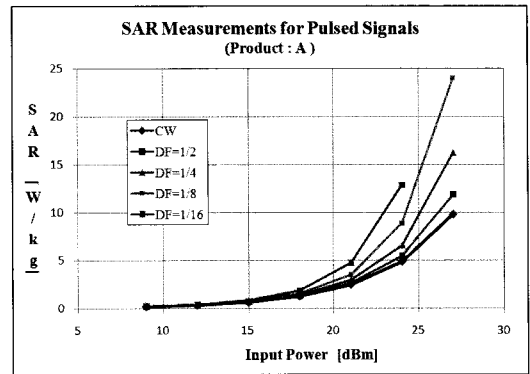
[그림 4] 입력 펄스 신호 형태

스 간격(6.4 ms)에서 펄스폭을 달리한 다양한 펄스파 (DF=1/2, 1/4, 1/8, 1/16)를 생성하여 평면 모의 인체에 입력하여 SAR 측정 시스템을 이용하여 펄스파의 DF 변화에 따른 SAR 값 변화를 측정하였다. 이때 펄스 신호의 DF를 변화시키더라도 평균 전력은 항상 일정하도록 하였으며, 평균 입력 전력이 9~27 dBm까지 3 dB간격으로 변화시키면서 SAR 값 변화를 각각 측정하였다.

2개사 제품의 SAR 측정용 프로브에 대하여 다양한 입력 펄스 신호에 대한 SAR 측정값은 [그림 5]와 같이 나타났다. 여기서 측정된 결과는 B사의 SAR 측



(a) A사 프로브



(b) B사 프로브

[그림 5] 펄스 신호에 대한 SAR 값 측정 결과

정용 시스템에서 A, B사의 SAR 측정용 프로브를 각각 설치하여 측정된 결과이다. 따라서 A, B사 제품의 측정 결과의 차이는 결국 SAR 측정용 프로브의 특성 차이로 간주할 수 있다.

[그림 5]에서 보는 바와 같이 CW 신호 입력시 입력전력이 증가함에 따라 A, B사 제품 모두 SAR 값이 선형적으로 증가하는 결과를 나타냈다. 이는 A, B사 제품 모두 CW 형태의 신호가 입력될 때 SAR 값을 올바르게 측정할 수 있음을 의미한다. 한편, 펄스 형태의 신호가 입력되는 경우, SAR 측정 결과는 프로브 제조사에 따라 각각 다른 결과를 나타내었다. 펄스 신호의 평균 입력 전력이 높아짐에 따라 SAR 값은 CW 신호보다 높은 값을 나타내었으며, 동일한 평균

입력 전력에서도 DF가 낮은 펄스 신호일수록 실제 SAR 값보다 높게 SAR 값을 측정하는 결과를 보였다. 특히 B사 제품의 경우, 입력 전력이 높아지고, 듀티 팩터(DF)가 낮아질수록 오차율이 상당히 크게 나타남을 볼 수 있다. 즉, [그림 3]의 다이폴 안테나에 공급되는 평균 입력 전력이 24 dBm, DF=1/16일 경우, A사의 SAR 프로브를 이용한 SAR 측정 결과는 CW 신호에 비해 23 % 정도 높게 측정되었으나, B사의 SAR 프로브를 이용한 SAR 측정값은 CW 신호에 비해 163 % 높게 측정되었다.

IV. 측정 오차 발생 원인 분석

4-1 측정 오차 발생 원인

SAR 측정 시스템은 식 (1) 및 식 (2)와 같이 SAR 측정용 프로브에 유기된 전압을 측정하여 SAR 값을 구한다. 그러나 [그림 6] (a)와 같이 SAR 측정용 시스템에 펄스 신호가 입력되는 경우, SAR 측정용 프로브는 [그림 6] (b)와 같이 입력 펄스 신호에 대하여 상승/하강 시간(τ_r, τ_f)을 가지고 반응한다. 즉, 펄스 형태의 입력 신호에 대하여 SAR 측정용 프로브는 순간적으로 반응하는 것이 아니라 Rising/Falling Time (τ_r, τ_f)을 가지고 반응한다.

이와 같이 펄스 입력 신호에 대하여 SAR 측정용 프로브가 Rising/Falling Time(τ_r, τ_f)을 가지고 반응하는 이유는 명확히 알려져 있지는 않으나, [그림 2]와 같이 SAR 프로브를 구성하는 쇼트키 다이오드에 내재된 접합 저항 및 접합 캐패시턴스, 프로브에서 수

신된 전압값을 전송하기 위한 고 저항선의 캐패시턴스 성분 등에 기인하는 것으로 추정된다.

SAR 측정용 프로브는 [그림 6] (a)와 같은 펄스 신호를 [그림 6] (b)와 같이 다른 형태의 신호로 인식하므로 SAR 값 측정 오차가 발생하는 원인이 된다. 따라서 SAR 측정용 시스템에 펄스 신호가 입력될 경우, 실제 SAR 값과 동일하게 측정하는지 아니면 높게 또는 낮게 측정하는지 여부는 SAR 측정용 프로브의 Rising/Falling Time(τ_r, τ_f)에 의존한다. 즉, [그림 6] (b)와 같이 1주기 동안의 곡선 아래 면적이 [그림 6] (a)의 사각형 펄스 신호 면적과 동일한지 아니면 차이가 나는지에 따라 결정된다. [그림 6] (b)의 1주기 동안의 프로브 응답 곡선은 다음과 같이 표현된다.

$$F(t) = 1 - e^{-t/\tau_r} \quad : 0 < t \leq T_{pw} \quad (4)$$

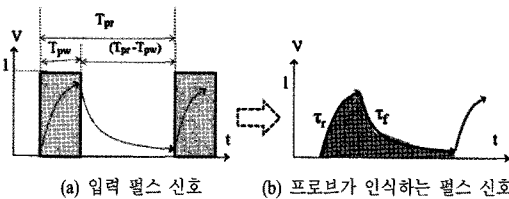
$$= A \cdot e^{-t/\tau_f} \quad : T_{pw} < t \leq T_{pr} \quad (5)$$

$$\text{where } A = 1 - e^{-T_{pw}/\tau_r}$$

여기서 식 (4)는 펄스 신호가 인가되었을 때 SAR 프로브의 Rising Time(τ_r)이며, 식 (5)는 SAR 프로브의 Falling Time(τ_f)이다.

따라서 [그림 6] (b)의 1주기 동안의 곡선 아래 부분의 면적은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} & \int_0^{T_{pr}} F(t) dt \\ &= \int_0^{T_{pw}} (1 - e^{-t/\tau_r}) dt + \int_{T_{pw}}^{T_{pr}} (A \cdot e^{-t/\tau_f}) dt \\ &= \int_0^{T_{pw}} (1 - e^{-t/\tau_r}) dt + \int_0^{T_{pr}-T_{pw}} (A \cdot e^{-t/\tau_f}) dt \\ &= [t + \tau_r \cdot e^{-t/\tau_r}]_0^{T_{pw}} - [A \cdot \tau_f \cdot e^{-t/\tau_f}]_0^{(T_{pr}-T_{pw})} \\ &= [(T_{pw} - \tau_r)(1 - e^{-T_{pw}/\tau_r})] - [(1 - e^{-T_{pw}/\tau_r}) \cdot \tau_f \cdot (e^{-(T_{pr}-T_{pw})/\tau_f} - 1)] \quad (6) \end{aligned}$$



[그림 6] SAR 프로브가 인식한 펄스 신호 형태

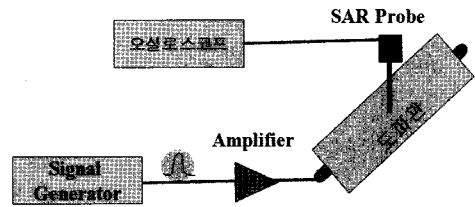
여기서 $e^{-(T_{pr}-T_{pw})/\tau_f}=0$ 으로 가정할 경우

$$\begin{aligned}
 \text{(식6)} &\approx [(T_{pw} - \tau_r(1 - e^{-T_{pw}/\tau_r})) + \\
 &\quad \tau_f \cdot (1 - e^{-T_{pw}/\tau_r}) \\
 &= T_{pw} + (\tau_f - \tau_r)(1 - e^{-T_{pw}/\tau_r}) \quad (7)
 \end{aligned}$$

따라서 SAR 측정용 프로브가 인식하는 펄스 신호의 세기는 식 (7)과 같이 간단한 형태로 표현될 수 있다. 식 (7)의 결과를 살펴보면 SAR 프로브가 인식한 펄스 신호의 평균값이 실제 펄스 신호의 평균값과 동일하지 여부는 SAR 프로브의 반응 시간(τ_r , τ_f)의 차이에 의존함을 알 수 있다. 즉, $\tau_r = \tau_f$ 일 때 SAR 프로브가 인식한 펄스 신호 평균값은 실제 펄스 신호의 평균값과 동일하며, 이는 펄스 신호에 의한 SAR 값이 CW 신호에 의한 SAR 값과 동일함을 의미한다. 즉, 펄스 신호에 대한 SAR 측정 에러는 0임을 나타낸다. 한편, $\tau_r < \tau_f$ 일 때는 SAR 프로브가 인식한 펄스 신호 평균값은 실제 펄스 신호의 평균값보다 크게 되며, 이는 펄스 신호에 의한 SAR 값이 CW 신호에 의한 SAR 값보다 높은 값을 나타냄을 의미한다. 즉, 펄스 신호에 대한 SAR 측정값은 실제 SAR 값보다 높게 측정되게 된다. 그리고 $\tau_r > \tau_f$ 일 때는 SAR 프로브가 인식한 펄스 신호 평균값은 실제 펄스 신호의 평균값보다 작게 된다. 이는 펄스 신호에 의한 SAR 값이 CW 신호에 의한 SAR 값보다 작은 값을 나타냄을 의미하며, 이는 펄스 신호에 대한 SAR 측정값은 실제 SAR 값보다 낮게 평가됨을 의미한다.

4-2 SAR 프로브의 반응시간 측정 및 분석

앞 절에서 살펴본 바와 같이 펄스 신호에 대하여 SAR 측정 오차가 발생하는 원인은 SAR 측정용 프로브의 반응시간(τ_r , τ_f) 차이에 기인함을 살펴보았다. 따라서 3장에서 펄스 신호에 대한 SAR 측정 에러를 보였던 A, B사 제품의 SAR 측정용 프로브에 대하여 상승/하강 시간(τ_r , τ_f)을 각각 측정하기 위하

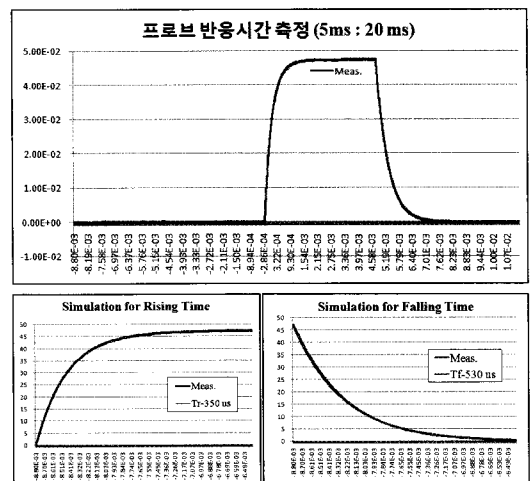


[그림 7] SAR 프로브의 반응시간 측정 시스템

여 [그림 7]과 같이 측정용 시스템을 구성하였다.

SAR 측정용 프로브의 반응 시간을 측정하기 위하여 신호 발생기를 이용하여 펄스 주기 20 ms, 펄스폭 5 ms인 펄스 신호를 생성하여 도파관에 입력하였다. 이는 프로브의 상승/하강 시간이 0.5 ms 정도임을 감안하여 충분히 긴 시간동안 펄스 신호를 인가함으로써 프로브의 상승시간과 하강시간을 편리하게 관찰할 수 있기 때문이다. [그림 8]은 30 dBm의 입력 펄스를 도파관에 입력하였을 때 B사 프로브의 응답 특성을 보여준다.

펄스 신호의 세기는 각각 21 dBm, 24 dBm 및 30 dBm인 전력을 도파관 내에 입력하였으며, 각 입력 전력에 대하여 오실로스코프로 펄스 신호에 대한 SAR



[그림 8] SAR 프로브 반응 시간 측정 예 (입력 P 30 dBm일 때, $\tau_r=350$ us, $\tau_f=530$ us임)

측정용 프로브의 반응 시간을 측정하였다. A, B사 제품의 SAR 프로브의 반응 시간을 측정한 결과는 <표 1>과 같이 나타났다.

<표 1>에서 A사 프로브의 경우에는 Rising Time과 Falling Time이 각각 500 μ s로 동일한 값을 보였으나, B사 프로브의 경우에는 Rising Time보다 Falling Time이 더 길며, 입력 전력이 증가함에 따라 차이는 점점 크게 나타났다. 이는 A사 프로브를 이용하여 펄스 신호에 대한 SAR 값을 측정하는 경우 오차없이 측정할 수 있으나, B사 프로브를 이용하여 펄스 신호의 SAR 값을 측정하는 경우에는 실제 SAR 값보다 높게 측정함을 의미하며, 입력전력이 높아질수록 오차는 더욱 커질 수 있음을 의미한다. 이는 펄스 신호에 대한 SAR 측정 결과인 [그림 5] (a)와 [그림 5] (b)의 결과와 정성적으로 일치한다.

4.3 SAR 측정 오차 해소 방안

앞에서 살펴본 바와 같이 펄스 신호에 대한 SAR 측정 오차 발생 원인은 프로브가 펄스 신호에 대하여 상승/하강 시간(τ_r , τ_f)을 가지고 반응하는데 기인한다. 특히 B사 프로브와 같이 펄스 신호에 대한 프로브의 상승 시간과 하강 시간이 각각 다를 경우, 기존 방식과 같이 CW 신호로 프로브를 교정한 상태에서는 펄스 신호에 대한 SAR 값을 올바르게 측정할 수 없음을 의미한다. 따라서 WiFi, GSM 등과 같이 펄스 신호에 대하여 SAR 값을 측정할 때는 SAR 측정용 프로브의 상승 시간과 하강 시간이 동일하지 여부를

먼저 확인하여야 한다. 그리고 펄스 신호에 대한 프로브의 상승 시간과 하강 시간이 각각 다를 경우에는 아래에서 기술하는 방법 중에서 하나를 선택하여 펄스 신호에 대한 SAR 값을 측정하여야 한다.

- (1) 측정 대상기기의 출력을 CW 모드로 설정하여 SAR 값을 측정한 후, 실제 펄스 신호의 듀티 팩터(DF)를 적용하여 SAR 값을 추정하여 계산하는 방안: 이 방법은 CW 신호로 프로브를 교정한 현재의 SAR 측정 시스템으로 펄스 신호의 SAR 값을 측정할 수 있는 장점이 있으나, 대상기가 CW 신호를 발생할 수 없는 경우에는 적용할 수 없는 단점이 있다.
- (2) 펄스 신호의 피크값을 측정하여 SAR 값을 추정하여 계산하는 방안^[5]: 이 방식은 CW 신호로 프로브를 교정한 현재의 SAR 측정 시스템으로 펄스 신호의 SAR 값을 측정할 수 있는 장점이 있으나, 펄스 신호의 펄스폭이 SAR 프로브의 상승 시간보다 작거나 비슷할 경우 적용할 수 없는 단점이 있다.
- (3) 펄스 신호에 대한 SAR 프로브의 반응시간을 테이블화하여 두고 펄스 신호에 대한 SAR 측정 결과를 보정하여 SAR 값을 구하는 방안: 이는 SAR 프로브의 반응시간에 무관하게 모든 형태의 펄스 신호에 대하여 오차없이 SAR 값을 측정할 수 있는 장점이 있으나, 펄스 신호에 대한 프로브의 상승/하강 시간을 각각 테이블화하는데 많은 시간과 노력이 요구되는 단점이 있다.

<표 1> SAR 프로브 반응 시간 측정 결과

입력 전력		21 dBm	24 dBm	30 dBm
A사 Probe	Rising time [μ s]	500	500	500
	Falling time [μ s]	500	500	500
B사 Probe	Rising time [μ s]	460	420	350
	Falling time [μ s]	530	520	530

V. 결 론

본 논문에서는 CW 신호를 이용하여 프로브를 교정한 SAR 측정 시스템에서 WiFi, GSM 등과 같이 펄스 신호에 대하여 SAR 값을 측정할 때, 측정 오차가 발생함을 살펴보았다. 그리고 이와 같이 펄스 신호에 대하여 SAR 측정 오차가 발생하는 원인은 프로

브가 펄스 신호에 대하여 상승/하강 시간(τ_r , τ_f)을 가지고 반응하기 때문에 나타나는 현상임을 확인하였다.

따라서 국립전파연구원에서는 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 제4장 3절에서 3가지 방안을 제시하였다. 여기서 제시한 방안들은 실제 적용에 있어서 일부 제약이나 장·단점이 있기는 하지만, 측정 대상기기의 특성에 따라 편리한 방법을 적용함으로써 펄스 신호에 대한 SAR 측정 에러를 최소화할 수 있기를 기대한다.

참 고 문 헌

- [1] 권용기, 최동근, 윤세정, 류충상, 김윤명, "펄스 신호에 대한 전자파인체흡수율(SAR) 측정 오차 분석", 한국전자파학회 제15회 전자기장의 생체 영향에 관한 워크샵, 2011년 8월 24일.
- [2] A. Sarolic, V. Roje and B. Modlic, "Measurement of electric field probe error for pulsed signals", *2006 IEEE International Symposium*.
- [3] FCC OET, "802.16e WiMax SAR Measurement Guidance", 2009년 11월 13일.
- [4] IEC Std. 62209-1, "Procedure to determine the specific absorption rate (SAR) for hand-held devices used in close proximity to the ear (frequency range of 300 MHz to 3 GHz)", 2005.
- [5] V. Monebhurrin, T. Letertre, "A novel measurement procedure for the specific absorption rate conformity assessment of WiFi devices", *APEMC 2009*.
- [1] 권용기, 최동근, 윤세정, 류충상, 김윤명, "펄스 신호에 대한 전자파인체흡수율(SAR) 측정 오차

≡ 필자소개 ≡

권 용 기



1989년 2월: 고려대학교 물리학과 (이학사)
 1992년 2월: 고려대학교 물리학과 (이학석사)
 2010년 2월: 한국과학기술원 정보통신공학과 (공학박사)
 1996년 9월~현재: 국립전파연구원 공업 연구사

[주 관심분야] 전파전파, 전파잡음, 전자파 인체보호

류 총 상



1990년 2월: 서울과학기술대학교 (공학사)
 1993년 8월: 광운대학교 전자공학과 (공학석사)
 1997년 8월: 광운대학교 전자공학과 (공학박사)
 1998년 5월~ 현재: 국립전파연구원 공업 연구관

2007년 5월~현재: 국제전기통신연합 전파관리기술연구분과 (ITU-R SG1) 부의장

[주 관심분야] 전파공학기술, 전자파 인체보호, 무선설비 기술기준

최 등 근



2003년 2월: 충북대학교 정보통신공학과 (공학사)
 2005년 2월: 충북대학교 정보통신공학과 (공학석사)
 2006년 7월~현재: 국립전파연구원 공업 연구사

[주 관심분야] SAR 평가 기술, 전자파 수치해석, 전자파 인체보호

김 윤 명



1975년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1977년 2월: 한국과학원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 1990년 9월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
 1977년 2월~1980년 2월: 금성정밀공업

주식회사(現 LIG 넥스원) 중앙연구소 연구원
 1980년 3월~현재: 단국대학교 전자전기공학부 교수
 2000년 6월~현재: (주)EMF Safety 대표이사

[주 관심분야] 전자파환경, EMI/EMC, 전자계의 인체영향측정, 무선전력전달 등