

전자파 비흡수율(SAR) 측정용 전기장 프로브의 검파 전압 특성

Characteristics of the Detection Voltages of an E-field Sensing Probe in SAR Measurement System

김윤명*** · 이승배** · 김기회****

Youn-Myoung Gimm*** · Seung-Bae Lee** · Ki-Hwea Kim****

요약

이동통신 기기로부터 복사되는 전자파가 인체에 흡수되는 에너지의 양은 모의 인체 내에서 전자파 비흡수율 [SAR(Specific Absorption Rate)]로 평가된다. RF 센싱 프로브의 Schottky 다이오드에 검출된 DC 전압은 높은 레벨에서 自乘法則(Square Law) 영역을 벗어나 선형성을 나타낸다. Square Law Region을 벗어난 직선 영역의 검파는 적절한 DCP(Diode Compression Point) 값으로 검파된 전압을 보상하여야 한다. 적절한 보상에 의한 한 점에서의 SAR 값은 200 W/kg까지 측정할 수 있다.

Abstract

The E-field intensity by mobile handsets in a phantom is measured by a 3 axes miniature probe. The detected DC voltage by a Schottky diode in a probe has nonlinear characteristics by itself. If a pertinent diode compression point (DCP) is applied for the compensation specific absorption rate(SAR) as much as 200 W/kg can be measured with a good measurement accuracy.

Key words : SAR(Specific Absorption Rate), Probe Linearity, Phantom, Isotropic Probe

I. 서론

이동통신 기기로부터 복사되는 전자파가 인체에 흡수되는 에너지의 양은 모의 인체 내에서 전자파 비흡수율[SAR(Specific Absorption Rate)]로 평가되며, 이때 모의 인체는 SAM(Specific Anthropomorphic Mannequin) 모델을 사용한다.

SAR은 단위시간 동안 단위질량당 인체 조직에 흡수되는 전자기장 에너지의 양으로 정의되며, 식 (1)과 같이 조직의 온도 증가율을 측정하거나 또는 식 (2)와 같이 전기장의 세기를 측정하여 구할 수 있

다^[1].

$$SAR = \frac{c\Delta T}{\Delta t} \Big|_{t=0} \text{ [W/kg]} \quad (1)$$

$$SAR(x, y, z) = \frac{\sigma(x, y, z) |E(x, y, z)|^2}{\rho(x, y, z)} \text{ [W/kg]} \quad (2)$$

여기서 C는 비열용량, ΔT는 온도 변화량, Δt는 노출 시간, σ는 모의 인체 용액의 전기전도도, |E|는 측정된 전기장 세기의 RMS값, 그리고 ρ는 매질의 질량밀도(mass density)를 나타낸다.

모의 인체 용액은 실제 사람의 조직과 전기적 특성이 같도록 제조되지만 질량밀도 ρ는 모의 인체

「본 연구는 대학IT연구센터인 충남대학교 전자파환경기술연구센터의 지원으로 수행되었습니다.」

*단국대학교 전기·전자·컴퓨터공학부(School of Electrical·Electronics & Computer Engineering, Dankook University)

** (주) EMF Safety(EMF Safety Inc.)

***전파연구소(Radio Research Laboratory)

· 논문 번호 : 20041105-18S

· 수정완료일자 : 2005년 1월 17일

용액과 실제 인체와는 다르다. 따라서 모의 인체 내에서 측정된 SAR 값을 실제 인체에서의 값으로 고려하기 위해 질량밀도 ρ 는 실제 인체 頭部の 값($\approx 1,000 \text{ kg/m}^3$)을 사용한다.

일반적으로 모의 인체 균일 매질에서의 체적 평균 SAR값은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다^[2].

$$SAR|_{\text{volume}} = \int_V \frac{SAR(x, y, z)dV}{V} \text{ [W/kg]} \quad (3)$$

여기서, V 는 모의 조직에서의 평균 SAR을 계산하기 위한 적분 체적으로 정6면체의 1 cm^3 또는 10 cm^3 이다.

일반적으로 매질 내에서 저전력 기기를 포함한 무선 통신 기기의 전기장 범위는 3 V/m 에서 350 V/m 이며 이에 상응하는 SAR 범위는 10 mW/kg 에서 100 W/kg 이고 온도 증가율로 나타내면 $3 \mu\text{K/s}$ 에서 40 mK/s 의 범위이다. 전자파에 의한 모의 인체 조직의 온도 변화율은 매우 미약하여 식 (1)의 온도 측정법은 거의 사용되지 않는다.

II. 전기장 프로브의 특성

2-1 전기장 프로브의 구조

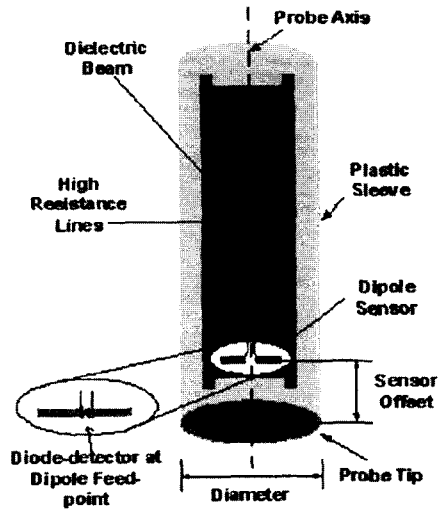
전기장 프로브의 일반적인 구조는 그림 1(a), (b)^[1]와 같이 각각 3개의 다이폴 센서와 고저항의 전송선(T/L)으로 구성되어 있으며 3개의 다이폴 센서는 서로 직교한다^[3].

고저항선 뒤의 프로브의 출력은 SAR 측정 시스템에서 가공·처리된다. 센서에 입사하는 전기장의 제곱에 비례하는 출력을 산출하기 위해서 프로브 3개의 센서 전압을 합성한다. 이상적인 다이오드 검파기의 응답에서 벗어나는 정도는 프로브 교정 과정에서 보상된다.

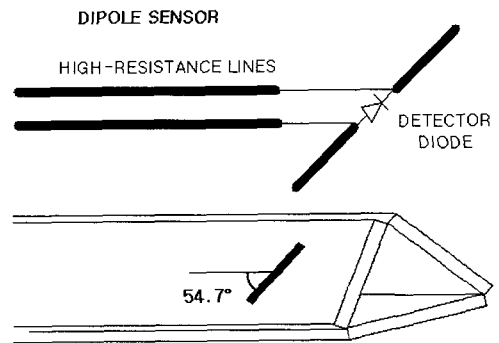
이러한 보상이 사용되면, 프로브 선형성 측정 불확정도 평가는 측정 시스템에 포함된 프로세싱과 보상 루틴으로 수행되어야 한다^{[1],[4]}.

2-2 Square Law 및 선형 검파

쇼트키 다이오드 검파기는 노이즈 레벨에 가까운 소신호를 검파하고 노이즈 이상의 큰 신호를 체크하기 위해 사용된다. 노이즈 레벨에서 -20 dBm 까지 전력 측정 시스템의 응답곡선의 기울기는 그림 2와



(a)



(b)

그림 1. (a) 프로브의 구성, (b) Δ -빔(또는 삼각기둥) 모양의 유전체를 사용하여 3개의 소형 다이폴센서가 서로 직교로 배열

Fig. 1. (a) Feature of an E-field probe, (b) Typical E-field probe construction of a Δ -beam(or triangular - beam). The dielectric structure supports the three miniature dipole sensors which pick up 3 orthogonal vector fields.

같이 상수값을 갖는다^[5]. 이 선형 구간이 Square Law 영역이며, 식 (4)로 표현할 수 있다.

$$V = K(\sqrt{P})^\alpha \quad (4)$$

여기서 P 는 고주파 입력 전력이고 V 는 출력 전압이다.

그림 3과 같이 -20 dBm 이하의 Square Law 영역에서 α 는 2에 근접하게 된다. 그 이상의 높은 전력 레벨에서 다이오드의 임피던스는 전력에 따라 변하고, α 는 0.9 정도의 작은 값을 갖게 되며 이때를 선

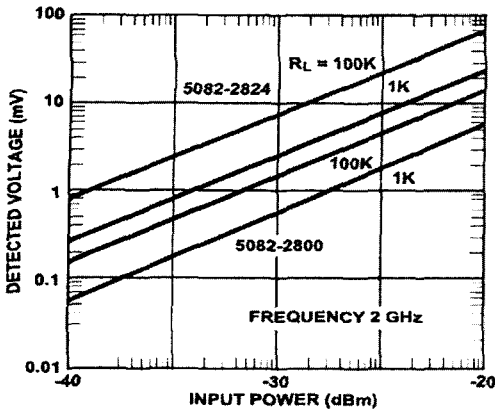


그림 2. RF 전력 측정시스템에서 정류하는 다이오드의 square law 응답 예
 Fig. 2. Example of square law response of a rectifying diode in a certain RF power measuring system.

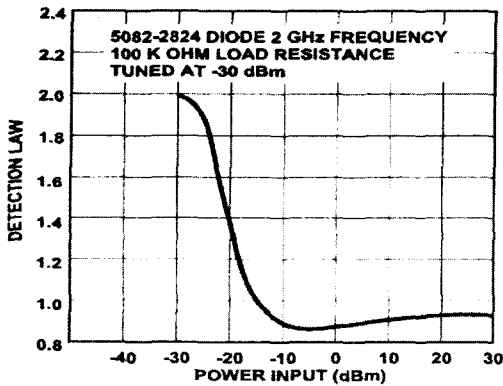


그림 3. 입력 전력에 따른 검파의 상관관계
 Fig. 3. Variation of detection law with input power.

형 영역(linear region)이라 부른다.

2-3 프로브의 비선형성 보상

그림 1(b)와 같이 다이폴 급전점에 있는 검파 다이오드는 센서의 출력 전압을 정류하고, 정류된 신호는 전송선(T/L)을 통해 전압 측정 시스템으로 전송된다. 전기장 세기가 작을 때 출력 전압은 입사 전기장 세기의 제곱에 비례하고, 높은 전기장에서 출력 전압은 E^2 에 비례하지 않는 대신 E 에 비례한다. 일반적으로 다이오드의 DC 전압은 식 (5)와 같이 제곱항을 더해 보상한다.

$$V_{compensated} = V_{out} + \frac{V_{out}^2}{DCP} \quad (5)$$

DCP(Diode Compression Point)는 V_{out} 가 예상 정류 DC 전압값의 1/2일 때 정해진다. 따라서 전압은 V_{out} 가 DCP와 같을 때 보상값의 두 배이다. 일반적으로 Low-barrier 실리콘 쇼트키 다이오드의 정류된 출력 전압인 DCP는 100 mV 정도이다^[1]. 이런 방법으로서 전기장의 세기가 큰 조건에서 SAR 값이 실제보다 적게 측정되는 것을 보상해준다.

펄스 변조 신호에서, DCP의 보상은 순시 신호에 대하여 행해져야 하며 출력은 진폭 변조율과 비례한다. 본 연구에서는 연속신호에 대해서만 고려하였다.

III. SAR 측정 시스템에서 프로브 보상

그림 4와 같이, 평면 팬텀 내에서의 1,800 MHz의 침투치 SAR을 측정하였다. 평면 팬텀에 담긴 모의 조직 용액의 유전율(ϵ_r)은 40.3이고 전기전도도(σ)는 1.41 [S/m]이다. 다이폴 안테나의 급전점과 평면 팬텀 안쪽 바닥 면 사이의 거리는 10 mm이다. 팬텀 내에서 침투치 SAR 값을 갖는 지점은 안테나 급전점 바로 위에 위치한다.

SAR 값은 평면 팬텀 내부의 표면으로부터 5 mm 이상에서 측정했으며, 5 mm 이내에서는 프로브의 Boundary Effect로 인해 매질 경계면의 전기장이 민감하게 변하기 때문에 외삽법을 이용하여 SAR을 계산하였다^[1].

그림 5(a)는 입력 전력의 변화에 따라 측정된 침

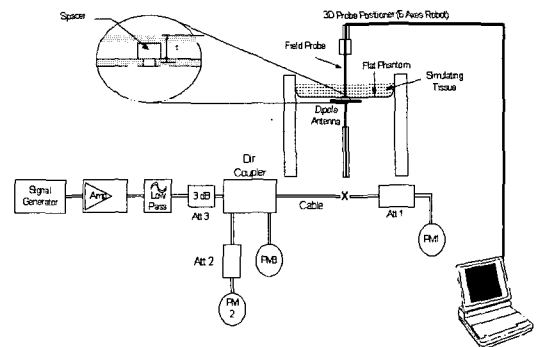
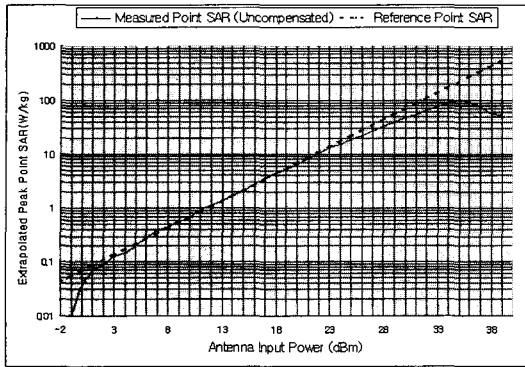
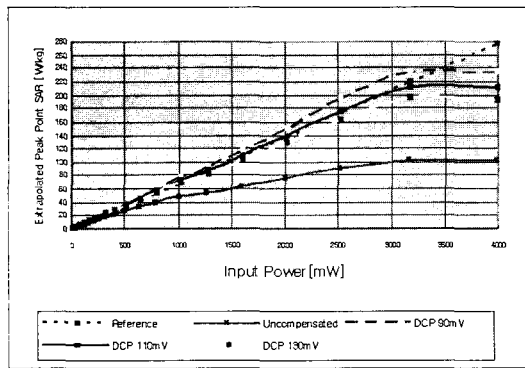


그림 4. SAR 측정 시스템의 성능 검사 블록 다이어그램^[1]
 Fig. 4. Test setup for the system performance check.

두치 SAR 값을 나타낸 것이다. 입력 전력이 34에서 35 dBm 사이에서의 예상된 기준 SAR 값은 측정값의 두 배이다. 그림 5(b)는 여러 가지 보상값에 따라



(a)



(b)

그림 5. (a) 1,800 MHz에서 입력 전력에 따른 팬텀에서의 보상되지 않은 침투 SAR 측정값 및 외삽법으로 산정된 SAR 값. 점선은 FDTD로 계산된 침투 SAR의 기준선이다^[1]. (b) 1,800 MHz에서 급전 안테나로부터 입력된 전력에 따른 평면 팬텀에서의 외삽법으로 산정된 침투 SAR 값. 보상되지 않은 값과 여러 가지 DCP 값으로 보상된 3 개의 곡선이 보여진다.

Fig. 5. (a) Uncompensated, measured and extrapolated peak point SAR in the phantom to variable input power of 1,800 MHz through the feeding antenna. The dashed line is FDTD calculated reference line on peak point SAR values^[1]. (b) Extrapolated peak point SAR in the flat phantom to variable input power of 1,800 MHz through the feeding antenna. An uncompensated and three compensated curves with different DCP value are shown.

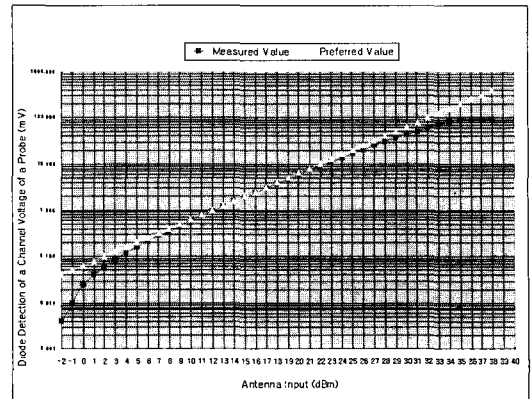


그림 6. 평면 팬텀 내부 표면으로부터 $z=5$ mm 지점에서의 프로브 한 채널에 검파된 DC 전압
Fig. 6. Detected DC voltage of a channel of a probe at $z=5$ mm above inner surface of the flat phantom.

측정된 침투 SAR 값을 나타낸 것인데, DCP가 90 mV일 때는 과잉 보상이고, DCP가 130 mV일 경우는 부족 보상이며 그리고 DCP가 110 mV일 때 적절한 값을 갖는다. 그림 5(b)에서 다이폴 안테나의 입력 전력 2,750 mW(34.4 dBm)인 경우, 보상된 침투 SAR 값은 보상되지 않은 값의 2 배임을 보여주고 있다.

그림 6에서 입력 전력이 34.4 dBm(2,750 mW)일 때, 보상되지 않은 다이오드의 단일 채널 출력 전압은 90 mV이다. 이는 DCP가 90 mV인 것으로 보이지만 실제 침투 SAR 측정에서는 DCP가 110 mV일 때 적절한 보상이 이루어진다.

적절한 DCP가 90 mV로 보이는 이유는 DC 증폭기가 입력 34 dBm에서 포화되기 시작하기 때문이다. DC 증폭기가 35 dBm 이상에서도 포화되지 않고 잘 작동했다면 DCP 레벨은 상승하게 될 것이다.

또한 우리는 DC 오프셋 전압을 제거한 후 그림 5(a)와 그림 6에서 보는 바와 같이 낮은 입력 레벨에서도 보상이 필요하다는 사실을 알았다. 이것은 식 (4)와 그림 3에서도 보여주고 있는데, 극소 전력 레벨에서 a 는 2보다 크다. 두 그림에서는 3 dBm 이하의 입력은 이동 통신 기기의 통상적인 출력보다 적기는 하지만 이것은 다른 연구에서 더 논의할 수 있을 것이다.

IV. 결 론

저전력 레벨에서 쇼트키 low barrier 다이오드에 검파된 DC 전압은 입력 전력에 비례한다. 이것이 Square Law 검파 영역이다. 높은 RF 입력 레벨에서 검파 특성의 기울기는 입력 전력의 평방근에 비례한다. Square Law 영역을 벗어난 선형 검파는 적절한 DCP 값으로 검파된 DC 전압을 보상하여 구해진다. 적절한 보상에 의해, 1800 MHz에서 Point SAR 값은 200 W/kg까지 측정하는 것이 가능하다.

참 고 문 헌

- [1] IEEE P1528/D.1.2, Recommended Practice for Determining the Peak Spatial-Average Specific Absorption Rate(SAR) in the Human Head from Wireless Communications Devices; Measurement Techniques, *IEEE WG1 of SC2 of IEEE SCC 34*, Apr. 2003.
- [2] Youn-Myoung Gimm, Young-Joon Joo, "Formulation of the sugar-free human head tissue simulant liquid for SAR measurement at 830 MHz", *China National Committee of URSI, 2004 Asia Pacific Radio Science Conference*, Qingdao, China, pp. 533-536, Aug. 2004.
- [3] A. Farone, D. O. McCoy, C. K. Chou, and Q. Balzano, "Characterization of miniaturized E-field probes for SAR measurements", *IEEE Intl. Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Washington, DC, pp. 749-754, 2000.
- [4] Catalog of SAR Measurement System ESSAY-3, EMF Safety Inc.
- [5] Agilent Technologies, Application Note 1986.

김 윤 명



1975년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1977년 2월: 한국과학원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 1990년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
 1977년 2월~1980년 2월: 金星精密

工業株式會社(現 넥스윈 퓨처) 레이더 기술자
 1980년 3월~현재: 단국대학교 전기·전자·컴퓨터공학부 교수
 2000년 6월~현재: (주) EMF Safety 대표이사
 [주 관심분야] 전자파 측정, EMC, 안테나 등

김 기 회



1995년 2월: 성균관대학교 물리학과 (이학사)
 1997년 2월: 성균관대학교 물리학과 (이학석사)
 1997년 12월~현재: 전파연구소 공업연구사
 2000년 9월~현재: 단국대학교 대학원 전자·컴퓨터공학과 박사과정

[주 관심분야] Dosimetry, EMC, 안테나 등

이 승 배



1998년 2월: 단국대학교 전자공학과 (공학석사)
 1977년~1999년 7월: 국방부 SEC 연구소 연구원
 2000년 2월~2001년 3월: SK 정보 기술 기술본부장
 2001년 3월~현재: (주) EMF Safety

기술부장
 [주 관심분야] 전자파 측정