

SAR 측정 및 교정 기술에 관한 한국-일본 공동 연구

김기희 · 오학태 ·

S. Watanabe*

전파연구소 ·

*정보통신연구기구(NICT)

요 약

한국의 전파연구소와 일본의 정보통신연구기구는 휴대전화와 같은 이동통신기기로부터 방사되는 전자파가 인체에 흡수되는 에너지 정도를 측정하는 전자파 흡수율(SAR) 평가에 대한 오차 연구를 공동으로 수행하고 있다. 본 논문에서는 동종의 SAR 시스템에서 프로브, 교정용 도파관 및 기준 다이폴 안테나를 상호 교체하여 교정하여 프로브의 교정인자를 구하고 유효성 검사를 통하여 교정 오차를 검증하였다. 프로브 교정에 대한 상호 오차는 0.2 dB 이하의 결과를 얻었으며, 유효성 오차는 최대 0.28 dB를 얻었다. 그러나 SAR 외삽 알고리즘이 다를 경우는 최대 0.48 dB의 상대 오차를 보였다.

I. 서 론

우리나라의 전파연구소(RRL: Radio Research Laboratory)와 일본의 정보통신연구기구(NICT: National Institute of Information and Communications Technology)는 1972년 전파에 관한 공동 연구 수행에 대해 상호양해각서(MoU)를 체결하였으며 2003년 MoU의 세부 수행 내용을 개정하였다. 여기에 새로운 과제로 휴대용 무선기기에 대한 전자파 흡수율(SAR: Specific Absorption Rate)의 평가 기술 연구 분야를 추가 확대하였으며, 2003년 말부터 구체적인 연구 진행 방향을 설정하여 추진해오고 있다.

한·일간 공동 연구는 SAR 측정의 상호 신뢰성

확보 및 정확한 측정 방법 마련을 위한 SAR 표준 측정 방법 마련을 최종 목표로 설정하였으며, 이를 위한 1차 공동 연구는 양 기관에서 보유하고 있는 SAR 측정 시스템의 검증 및 교정에 대하여 연구를 수행하였다.

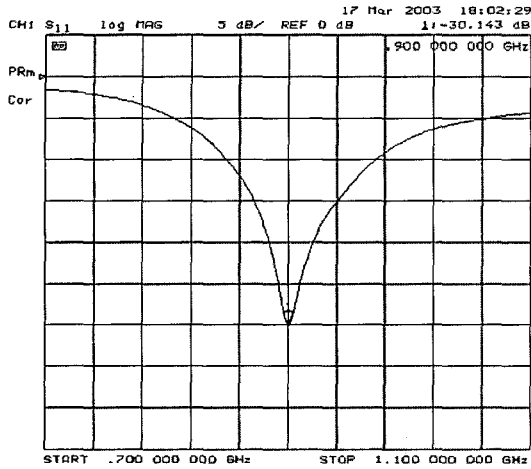
기준 다이폴 안테나 제작과 유전율 측정 시스템의 유효성 검사 시험은 각 기관에서 개별적으로 진행하고 그 결과를 서로 비교 검토하였다. 이때 사용된 주파수는 일본에서 사용하는 셀룰러 휴대전화의 중심 주파수인 900 MHz와 우리나라의 IMT-2000 주파수 대역의 중심 주파수인 1,950 MHz로 정하였다. 프로브 교정과 SAR 측정 시스템의 유효성 측정은 1차 실험과 2차 실험으로 나누어 수행하였다. 1차 실험은 NICT의 SAR 연구실에서 양 기관이 보유하고 있는 프로브와 다이폴 안테나를 NICT의 측정 시스템을 이용하여 측정하였으며, 2차 실험은 RRL의 SAR 연구실에서 양쪽의 프로브와 다이폴 안테나를 RRL의 SAR 측정 시스템으로 측정하여 양쪽의 시험 결과를 비교 분석하였다.

II. 본 론

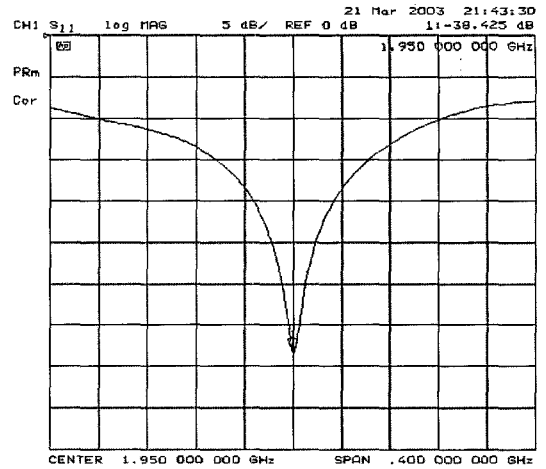
2-1 다이폴 안테나 제작 및 특성 측정

NICT에서 사용한 900 MHz와 1,950 MHz에 대한 유효성 시험용(system validation test) 다이폴 안테나는 상용 제품을 사용하였으며 RRL에서는 자체 제작한 다이폴 안테나를 사용하였다.

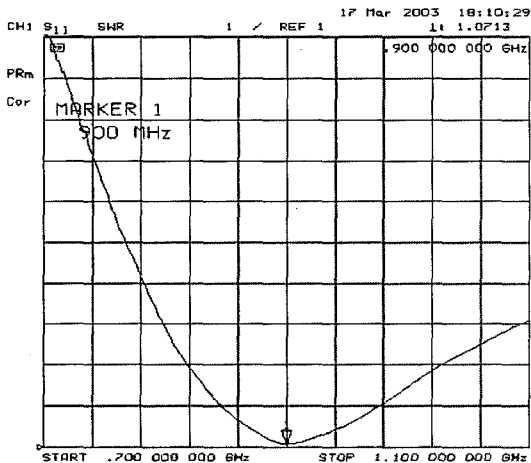
SAR 측정은 일반적으로 자유 공간이 아닌 고유



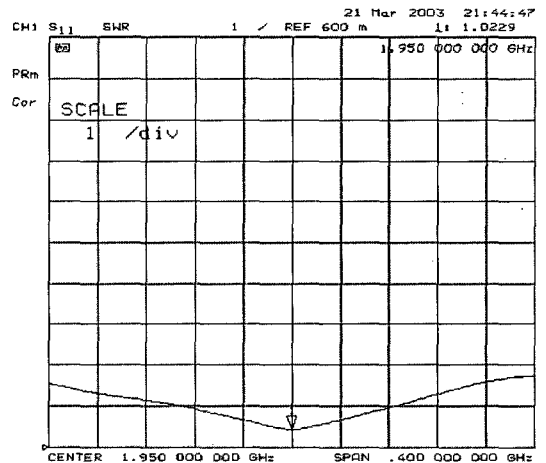
[그림 1] 900 MHz dipole antenna의 반사 손실



[그림 3] 1,950 MHz dipole antenna의 반사 손실



[그림 2] 900 MHz dipole antenna의 VSWR



[그림 4] 1,950 MHz dipole antenna의 VSWR

전 액체내에서의 특성을 측정하는 것이기 때문에 다이폴 안테나는 정해진 시스템에서 평면 모의인체 (flat phantom) 내로 손실을 최소화하며 전달되어야 한다.

일반적으로 반사 손실은 -20 dB 이하로 하되 900 MHz의 경우, 다이폴 안테나의 feeding point와 평면 팬텀의 안쪽 바닥과의 거리를 15 mm로 이격시키고, 1,950 MHz의 경우는 10 mm의 이격 거리를 유지하

여 측정한다.

[그림 1]에서 4는 각 주파수에서 측정된 안테나의 특성으로 900 MHz 다이폴 안테나의 반사 손실은 -30.1 dB이며 정재파비는 1.07이고, 1950 MHz의 안테나 특성은 반사 손실이 -38 dB이고 정재파비는 1.02로 좋은 특성을 보여주고 있다. NICT의 다이폴 안테나의 반사 손실은 900 MHz에서 -30.5 dB이다.

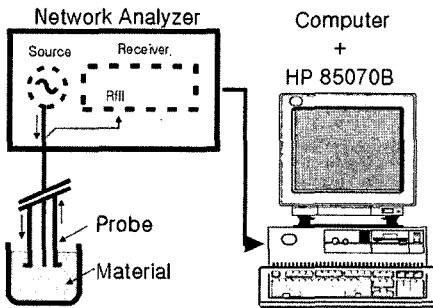
측정에 사용된 평면 팬텀 내의 모의 조직은 900

MHz와 1,950 MHz의 모의 인체 두부 조직에 해당하는 전기 정수를 사용하였으며, 전기적 특성은 각각 유전율이 41.5와 40.0 그리고 전기 전도도는 0.97 S/m와 1.4 S/m이다.

2-2 유전을 측정 시스템의 유효성 시험

전자파 흡수율 측정은 모의 인체 조직을 제조하고 제조된 액체의 유전 특성을 확인하는 과정을 거친다. 모의 인체 조직에 대한 유전을 측정은 크게 두 가지 방법을 사용하는데 그것은 프로브 접촉법(contact probe method)과 슬롯 라인 방법(slotted line method)이다. 이중 슬롯 라인 방법이 더 정확한 측정 방법이지만 고출력의 신호원을 요구하며 측정 또한 까다롭기 때문에 프로브 접촉법이 가장 일반적으로 사용되고 있다.

본 공동 연구에서는 양 기관 모두 접촉 프로브 방법(Agilent Technology 85070 series)을 이용하여 유전을 측정이 이루어졌다. 프로브 접촉법의 시스템 구



[그림 5] 유전율 측정 시스템

성은 [그림 5]와 같다. 프로브를 VNA의 포트에 연결하여 반사(S_{11})를 측정하고 측정된 값을 계산하여 대상 액체의 상대 유전율(permittivity)과 전기전도도(conductivity)를 얻을 수 있다.

RRL과 NICT 모두 측정에 사용한 기준 시료는 순도 99.8 % 이상의 Methanol을 사용하였다. 기준시료의 기준 데이터는 National Physical Laboratory Report CETM 33(〈표 1〉)을 참고로 하였다. RRL의 경우, 20 °C의 메탄올을 NICT는 25 °C의 메탄올을 사용하여 측정하고 기준 데이터와 비교하여 각 기관의 유전율 측정 시스템의 유효성을 확인하였다.

[그림 6]과 [그림 7]에서 보는 바와 같이, 측정된 전기 정수값에서 NICT의 경우, 시스템의 유효성이 RRL의 시스템보다 약간 더 정밀하게 나타났다. 그러나 양쪽 모두 전기정수 값은 기준 데이터로부터 5 % 이내의 범위에 있어 유효한 결과를 보여줬다.

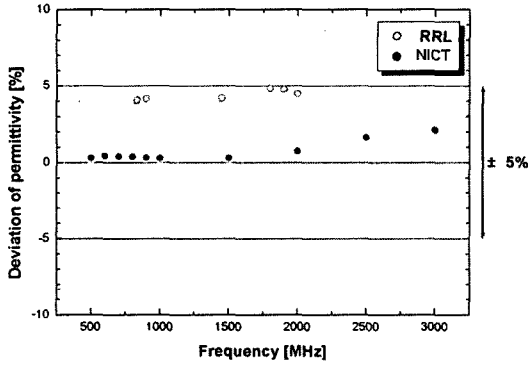
RRL의 데이터보다 NICT의 데이터가 좀더 유효한 결과를 보이며 이것이 SAR 측정에서의 교정과 유효성 시험에 불확정성 요인이 어느 정도 작용할 것인지에 대한 연구가 추후 보완되어져야 할 것으로 보인다.

2-3 프로브 교정

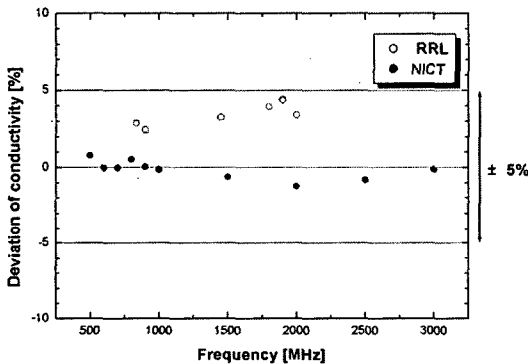
프로브의 정확한 특성을 결정짓는 요소중의 하나는 바로 교정이다. 여기서 말하는 프로브의 교정은 하드웨어적인 교정이 아닌 소프트웨어적인 교정으로 교정을 통해 프로브의 conversion factor를 구하는 것이다. Conversion factor는 공기중의 감도에 대한 측정 매질의 감도비를 나타내며 이를 구하기 위해 사용되는 방법은 두 가지가 있다. 첫 번째 방법은 직립

〈표 1〉 메탄올의 기준데이터(NPL report CETM 33)

Reference Material	Temp. °C	Ref.	Model	ϵ_s	ϵ_∞	τ (ps)	β
Methanol	20	NPL. 2001	Debye	33.64	5.68	56.6	0
Methanol	25	NPL. 2001	Debye	32.67	5.58	500.8	0



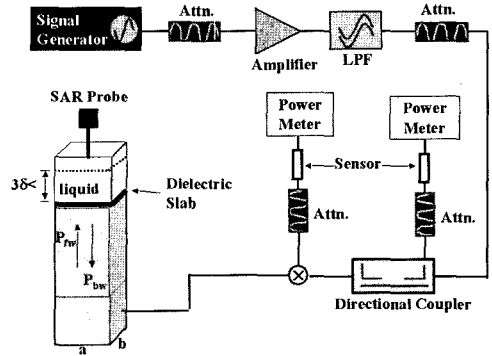
[그림 6] 상대유전율의 유효성 오차



[그림 7] 전기전도도의 유효성 오차

개방형 도파관(upright-standing open waveguide)을 이용한 도파관 교정 방법이며, 다른 하나는 매질내에서 전기장 세기와 온도 상승 사이의 관계를 이용한 온도 프로브(temperature probe)를 이용하는 방법이다. 본 연구에서는 IEC TC106/62209-1에서 권고하는 직립 개방형 도파관 방법을 이용하였다. 양 기관의 교정 시스템은 [그림 8]과 같이 구성하였다.

직립 개방형 도파관에 측정하고자 하는 주파수 대역에 해당하는 유전 특성을 갖는 모의 인체 조직을 투과 깊이(δ)의 3배 이상 담은 후 시스템을 구성하여 도파관 중심에서 높이에 따른 SAR(z) 값을 측정한다.



Upright-standing open Waveguide

[그림 8] 프로브 교정 시스템 구성도

우리가 흔히 말하는 SAR 값은 실제 측정하는 매질에서의 전자파 흡수 에너지를 말하는 것이 아니라 측정에 사용되는 매질에서 측정된 SAR_{liquid}를 이용하여 아래 식과 같이 실제 인체머리에서의 SAR_{head}를 구한다.

$$\begin{aligned} SAR_{head} &= \frac{\rho_{liquid}}{\rho_{head}} SAR_{liquid} \\ &= \frac{\rho_{liquid}}{\rho_{head}} \frac{\sigma_{liquid} |E|^2}{\rho_{liquid}} \\ &= \frac{\sigma_{liquid} |E|^2}{\rho_{head}} \end{aligned}$$

위의 시스템 구성에서 이론적인 계산에 의한 SAR 값은 아래와 같이 계산이 가능하다.

$$\begin{aligned} SAR(z) &= \frac{4(P_{fw} - P_{bw})}{\rho ab \delta} \cos^2\left(\pi \frac{y}{a}\right) e^{-2z/\delta} \\ \delta &= [Re[\sqrt{(\frac{\pi}{a})^2 + j\omega\mu_0(\sigma + \epsilon_0\epsilon_r)}]]^{-1} \end{aligned}$$

여기서 P_{fw} 는 도파관의 입사 전력이고, P_{bw} 는 반사전력이며, δ 는 모의 인체 조직에서의 침투 깊이이며 P 는 질량 밀도이다. 프로브 교정은 측정된 값을 이론적인 값에 fitting하고 이때 사용된 fitting parameter를 구하는데 이것을 conversion factor라고 한다.

즉, 프로브의 교정은 정확한 E-field의 세기를 구하기 위해 프로브 끝단에 있는 서로 직교하여 배열된 미소다이폴안테나에서 받아들인 전압과 전기장 세기와의 비례 상수를 구하는 것이다.

$$|E|^2 = V_x/\gamma_x + V_y/\gamma_y + V_z/\gamma_z$$

여기서, V_x , V_y 그리고 V_z 는 SAR 프로브의 각 미소다이폴 안테나에서 받아들인 전압이며, $|E|^2$ 는 전기장 세기의 RMS 값이고, γ_x , γ_y 및 γ_z 는 미소다이폴 안테나의 감도(sensitivity)이다.

프로브 교정시 사용한 RRL과 NICT의 프로브는 SPEAG사의 ET3DV6를 사용하였다. 또한 이때 사용한 waveguide의 cross section은 다음과 같다.

- for 900 MHz : 248(L) mm × 124(W) mm
- for 1950 MHz : 109(L) mm × 54.7(W) mm

Waveguide의 내부에 사용된 spacer는 손실이 거의 없는 상대 유전율 3.3의 테프론 재질을 사용하였으며 각각의 두께는 다음과 같다.

- for 900 MHz : 50 mm
- for 1,950 MHz : 25 mm

<표 2>는 900 MHz에서 waveguide의 S_{11} 특성과 교정 인자를 나타낸 것이다. 양쪽의 교정 데이터 편차는 최대 0.2 dB(4.7 %)로 $K=1$ 일 때의 전형적 불확정도 4.8 %와 거의 유사한 값을 보여주었다. 그러나 1950 MHz에서의 교정 결과는 NICT의 waveguide에 대한 신뢰성이 확인되지 않아서 이번 공동 연구에서 제외하고 추후 연구에서 확인하도록 하였다.

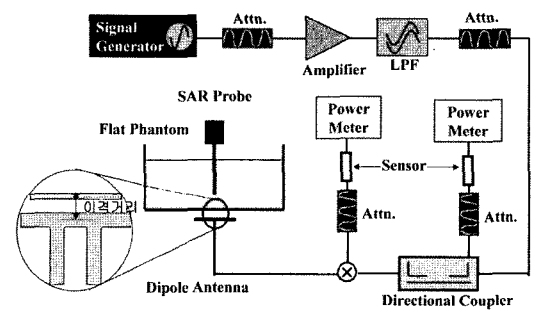
2.4 시스템 유효성 시험

시스템의 유효성 시험은 평면 팬텀과 표준 다이폴 안테나를 사용하여 양 기관에서 공동으로 수행되었다. 본 시험에서는 프로브 교정 시험시 NICT의 waveguide의 문제로 인하여 900 MHz에서만 수행하였다.

시스템 유효성 시험에 앞서 측정된 양쪽의 프로

<표 2> 프로브 교정 인자 및 waveguide의 S_{11} 특성

Site	NICT	RRL	Dev [dB]	
Cal. Factor of NICT probe	γ_x	11.8	12.2	-0.14
	γ_y	10.9	10.4	0.20
	γ_z	12.5	12.5	0.00
Cal. Factor of RRL probe	γ_x	9.2	9.0	0.10
	γ_y	8.9	8.9	0.00
	γ_z	9.8	9.9	-0.04
S_{11} of Waveguide	-9.63 dB	-9.89 dB	—	
ϵ_r of Liquid	40.8	40.7	—	
σ of Liquid	0.99 S/m	0.97 S/m	—	



[그림 9] 시스템 유효성 시험 시스템 구성도

브에 대한 특성을 살펴보겠다. 유효성 측정 시스템은 [그림 9]와 같이 구성하였다. 유효성 검사에서 다이폴 안테나의 입력은 프로브의 응답 특성 범위에 맞춰 설정되어야 한다.

일반적으로 프로브의 측정 응답 범위는 0.4 W/kg에서 8 W/kg이다. 여기서는 응답 특성의 범위의 중간값으로 설정하여 900 MHz에서는 24 dBm을 1,950 MHz에서는 21 dBm을 사용하였다.

유효성 시험을 위해 제조된 두부 모의 인체 조직의 목표값은 900 MHz에서 유전율이 41.5이며 전기전도도 값은 0.97 S/m이며 목표값에 대해 ±5 % 오차를 허용한다. NICT와 RRL에서 제조되고 측정된 전기정수는 각각 상대 유전율이 41.3과 42.0이며, 전기전도도는 각각 0.97 S/m과 0.98 S/m으로 유효 오차 범위 내에서 제조되었다.

900 MHz 대역에서의 RRL 프로브의 등방성 오차는 ± 0.15 dB 이내이다. 양 기관에서 수행한 SAR 측정 시험에는 몇 가지 다른 시험 조건이 있다.

첫째는 RRL의 측정 S/W는 DASY3를 사용하였으며 NICT는 DASY4를 사용하였다. DASY3와 DASY4는 기본 측정 알고리즘은 동일하나 측정 데이터로부터 외삽(extrapolation) 데이터를 얻을 때 약간 다른 알고리즘을 사용한다. 둘째는 사용한 모의 인체 조직의 전기정수 값이 서로 다른데 RRL의 경우 실제로 측정된 값을 사용하였으며 NICT의 경우 목표값을 사용하였다. <표 3>은 양 기관에서 측정한 유효성 검사 결과를 요약하여 정리한 것이다.

측정 결과에서 양 기관의 시스템에 대한 상호 오차는 최대 0.48 dB로 약 11 % 정도이다. 이는 SAR 측정 시스템의 확장 계수 $K=1$ 일 때의 불확정도 10.2 %와 유사한 값이나, 동일 제조사 제품인 점을 감안할 경우 적지 않은 값이라 할 수 있다. 우선 양 기관에서 측정 환경을 동일한 조건으로 하여 위 결과를 재 계산하여 보았다. 우선 양 기관에서 사용한 전기정수 적용방법을 RRL의 조건으로 일치시켜 보았다. 결과는 <표 3>에서 보여준 이전의 측정 결과와 거의 동일하다. 그 이유는 NICT에서 적용한 목표값과 실제 제조되어 측정된 전기 정수 값이 거의 같기 때문에 측정 결과에는 거의 영향이 없는 것이다. 다음에는 위에서 언급된 첫 번째 조건을 일치시키기 위해 두 시스템에서 측정된 데이터를 DASY4 알고리즘

<표 3> RRL과 NICT의 시스템 유효성 실험 결과(RRL : DASY3 외삽 알고리즘, NICT : DASY4 외삽 알고리즘)

Probe	Dipole	1-g SAR			10-g SAR		
		NICT	RRL	Dev [dB]	NICT	RRL	Dev [dB]
NICT	NICT	10.2	11.4	-0.48	6.56	7.15	-0.37
NICT	RRL	10.8	11.5	-0.26	6.93	7.21	-0.17
RRL	NICT	10.4	11.4	-0.43	6.76	7.19	-0.27
RRL	RRL	11.2	11.4	-0.08	7.11	7.13	-0.01

<표 4> RRL과 NICT의 시스템 유효성 시험 결과(RRL, NICT : DASY4 외삽알고리즘으로 재계산)

Probe	Dipole	1-g SAR			10-g SAR		
		NICT	RRL	Dev [dB]	NICT	RRL	Dev [dB]
NICT	NICT	10.4	10.5	-0.13	6.56	6.78	-0.14
NICT	RRL	10.8	10.6	+0.08	6.93	6.83	+0.06
RRL	NICT	10.4	10.4	-0.03	6.76	6.79	-0.02
RRL	RRL	11.2	10.5	+0.28	7.11	6.75	+0.22

(DASY3의 optional extrapolation algorithm)을 이용하여 재계산하였다.

<표 4>는 동일한 알고리즘으로 측정값을 계산한 결과이다. 여기서 두 기관의 SAR 측정 시스템간 상호오차는 최대 0.28 dB로 이전의 상호 오차에 비해 현저히 줄어들음을 알 수 있다.

III. 결 론

본 한일 공동 연구에서는 다이폴 안테나 제작, 유효성 측정 시스템의 유효성 시험과 프로브 교정 그리고 900 MHz에 대한 SAR 측정 시스템의 유효성 시험이 이루어졌다. 상호 시스템의 비교시험에 대한 결과는 현재 단일 주파수 대역에 대한 측정 결과만으로는 결론짓기는 힘들다.

현재까지의 측정 결과로부터 우리는 최종 결과에 미치는 불확정도의 원인을 다음과 같이 분류해볼 수 있다. 첫째는 전기정수에 대한 불확정도 요인으로 액체의 온도 제어와 측정 데이터의 평균 절차 및 유효성 검사 절차 등을 들 수 있으며 둘째로는 프로브 교정과 시스템 유효성 검사에서 다이폴 안테나와 waveguide의 입력의 안정성을 들 수 있다.

우리가 사용한 시스템에서는 입력 신호의 안정 상태를 확인한 후 측정하였으나 측정과정에서 신호 발생기와 파워미터 및 기타 장비에서 발생하는 thermal noise에 의한 입력 신호의 변화를 무시할 수 없다. 입력신호는 전력은 크기는 1 dB 이상 변화하고

이는 0.01 dB 이상 정밀하게 측정되는 교정이나 유효성 검사의 입력신호제어에 큰 영향을 미칠 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] N. Kuster, Q. Balzano, "Energy absorption Mechanism by biological bodies in the near field of dipole Antennas above 300 MHz", *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, vol. 41, no. 1, Feb. 1992.
- [2] IEC TC106/62209-1, "Procedure to measure the Specific Absorption Rate(SAR) in the frequency range of 300 MHz to 3 GHz ; Part 1 : hand-held mobile wireless communication devices", 2005.
- [3] N. Kuster, Q. Balzano, and James C. Lin, *Mobile Communications Safety*, Chapman & Hall, pp. 17-19, 1997.
- [4] A. P. Gregory, R. N. Clarke, NPL Report CETM 33, "Tables of the complex permittivity of dielectric reference liquids at frequencies up to 5 GHz", NPL, Sep. 2001.
- [5] Q. Yu, M. Aronsson, Ding Wu, and Om P. Gandhi, "Automated SAR measurements for compliance testing of cellular telephones", *Proceeding of the IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 4, pp. 1980-1983, 1998.
- [6] Q. Balzano, O. Garay, and T. J. Manning, Jr., "Electromagnetic energy of simulated users of portable cellular telephones", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 44, no. 3, pp. 390-403, Aug. 1995.

≡ 필자소개 ≡

김 기 회



1995년 2월: 성균관대학교 물리학과 (이
학사)

1997년 2월: 성균관대학교 물리학과 (이
학석사)

1997년 12월~현재: 정보통신부 전파연
구소 공업연구사

[주 관심분야] 전자파 측정기술, 전자파

인체노출량 평가기술

Soichi Watanabe

Dr. Eng.

Wireless Communications Department

EMC Center

Biomedical EMC Group

National Institute of Information and Communications Tech-
nology(NICT) Nukuikitamachi 4-2-1, Koganei, Tokyo 184-
8795, Japan

오 학 태



1989년 2월: 부산대학교 물리학과 (이학
석사)

1993년 2월: 부산대학교 물리학과 (이학
박사)

1994년 1월~1996년 1월: 日本 國立 大
阪大學 理學部 物理學科 客員研究員

1996년 11월~현재: 정보통신부 전파연

구소 공업연구관

[주 관심분야] 전자파인체보호기준, 전자파인체노출량 평가
기술, 전자파 측정기술