

SAR 측정용 전기장 프로브의 교정

김 윤 명

단국대학교

I. 서 론

SAR 측정 시스템은 생체가 전자계에 노출됨에 따라 생체에 흡수되는 단위 질량 당의 흡수 전력을 측정하는 것으로, 인체를 대상으로 하는 직접 측정이 곤란하므로 시험 주파수에서 인체 조직과 유사한 전자기 정수를 갖는 모의 인체(팬텀)를 가지고 실제와 유사한 조건으로 SAR을 측정하는데, 전자파를 조사(照射)했을 때 팬텀내의 전기장 세기를 프로브(전계 센서)로 측정하는 시스템이다. SAR 측정 장비의 핵심 부품인 전기장 프로브는 시스템 품질에 매우 큰 영향을 끼치므로 정기적인 교정이 필요하다. 전기장 프로브의 교정에 필요한 절차는 프로브의 비선형성 보상, 자유 공간에서의 센서 민감도 평가, 매질 내에서의 민감도 평가 등이 있으며, 시스템 성능 검사를 통하여 프로브의 교정을 확인한다.

II. 전자파 비흡수율 (SAR: Specific Absorption Rate) 측정

이동 통신 기기로부터 방사되는 전자파가 인체에 흡수되는 에너지의 양은 SAR(Specific Absorption Rate)로 평가되며, 이때 모의 인체는 SAM(Specific Anthropomorphic Mannequin)이라는 인체 모형 팬텀을 사용한다.

SAR은 단위 시간동안 단위 질량의 인체 조직에 흡수되는 전자기장 에너지의 양으로 정의되며, 식 (1)과 같이 조직의 온도의 증가율을 측정하거나 식 (2)와 같이 전기장의 세기를 측정하여 구할 수 있다^[1].

$$SAR = \frac{C \Delta T}{\Delta t} \Big|_{t=0} [W/kg] \tag{1}$$

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

여기서 C는 비열 용량(비열 용량: Specific Heat capacity), ΔT 는 온도 변화량, Δt 는 노출시간, σ 는 모의 인체 용액의 전기 전도도, $|E|$ 는 측정된 전기장의 세기의 RMS 값 그리고 ρ 는 매질의 질량 밀도를 나타낸다.

모의 인체 용액은 실제 인체 조직의 전기적 특성과 동일하도록 제조하지만 질량 밀도 ρ 는 서로 다르다. 따라서 모의 인체 내에서 측정된 SAR 값을 실제 인체에서의 값으로 환산하기 위해 질량 밀도 ρ 는 인체 두부의 값(1,000 kg/m³)을 사용한다. 일반적으로 모의 인체 균일 매질에서의 체적 평균 SAR은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다^[2].

$$SAR|_{avg} = \frac{\int_v SAR(x, y, z) dV}{V} [W/kg] \tag{3}$$

여기서, V는 모의 조직에서 평균 SAR을 계산하기 위한 적분 체적값으로 1 cm³ 또는 10 cm³이다.

일반적으로 매질 내에서 저전력 기기를 포함한 무선 통신기기의 전기장 범위는 3 V/m~350 V/m이며 이에 상응하는 SAR 범위는 10 mW/kg~100 W/kg 이고, 온도 증가율은 3 μ K/s~40 mK/s의 범위이다. 전자파에 의한 모의 인체 조직의 온도 변화율은 매우 미약하여, 이동통신 단말기의 SAR 측정에 있어서 식 (1)에 의한 온도 변화 측정법은 거의 사용되지

않고 있다.

III. 전기장 프로브

3-1 프로브의 정의 및 구성

프로브는 세 개의 서로 직교하는 다이폴로 구성된 소형의 등방성 안테나로, 무선 주파수 신호를 직류 전류 또는 직류 전압으로 변환하여 모의 인체에서 흡수되는 전자파 에너지의 전기장 강도를 측정할 수 있다.

전기장 측정기기의 주요 구성 요소로는, 다이폴 센서, 검파 다이오드, 적절한 전기 회로 그리고 출력 부이며, 세 개의 센서는 서로 직교하도록 연결하고 센서 사이가 근접시켜 등방성을 가지도록 한다. 검파된 신호는 고저항선을 통해서 전달되며, 다이폴 단자(terminal)에 유도된 전압은 작은 다이폴의 유효 길이에 정비례한다.

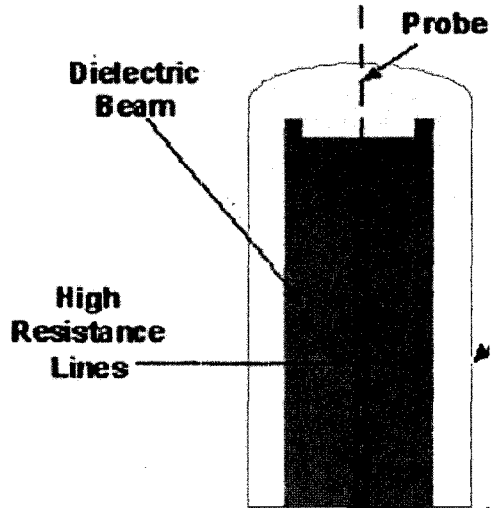
3-2 프로브의 특성

전기장 프로브는 무선 주파수 신호를 DC 신호로 정류하기 위하여 검파 다이오드를 사용하며, 주로 Schottky 다이오드가 사용되며 프로브에 검파된 신호는 전압은 전기장의 세기에 따라 E 혹은 E^2 에 비례한다. 대부분의 등방성 전기장 프로브는 세 개의 작은 다이폴 센서로 구성되는데, 각 센서에는 검파 다이오드가 있으며, 센서의 지향 패턴은 서로 직각이고, 전기장의 전체 크기는 프로브의 직각 성분들의 RSS(Root-Sum-Square)에 비례한다.

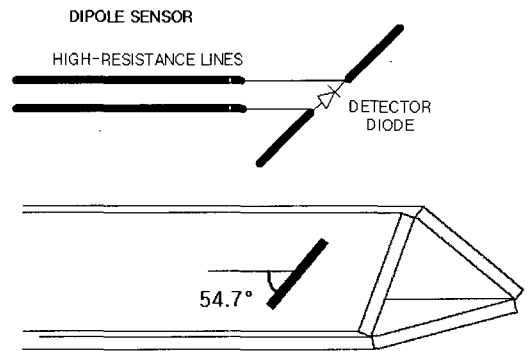
3-3 프로브의 구조

전기장 프로브의 일반적인 구조는 [그림 1(a), (b)]와 같이 각각 3개의 다이폴센서와 고저항의 T/L으로 구성되며 3개의 다이폴 센서는 서로 직교한다^[3].

고저항선 뒤의 프로브의 출력은 SAR 측정 시스



(a) 프로브의 구성



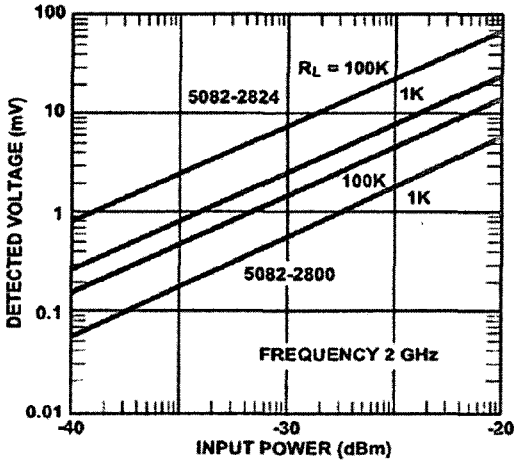
(b) Δ 빔(또는 삼각기둥) 모양의 유전체를 사용하여 3개의 소형 다이폴 센서를 배열시킨다.

[그림 1] 전기장 프로브의 구조

템에서 가공 처리된다. 센서에 입사하는 전기장의 제곱에 비례하는 출력을 산출하기 위해서 프로브의 센서 전압을 합성한다. 이상적인 다이오드 검파기의 응답에서 벗어나는 것은 프로브 교정을 통하여 보상된다.

3-4 Square Law 및 선형 검파

쇼트키 다이오드 검파기는 노이즈 레벨에 가까운



[그림 2] RF 전력 측정 시스템에서 정류하는 다이오드의 Square Law 응답 예

소신호와 노이즈 이상의 큰 신호를 검파하기 위해 사용된다. 노이즈 레벨에서 -20 dBm까지 전력 측정 시스템의 응답 곡선의 기울기는 [그림 2]와 같이 상수값을 갖는다^[4]. 이 선형 구간이 Square Law 영역이다.

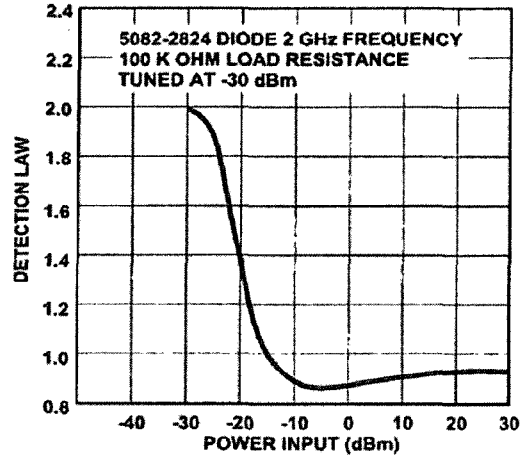
$$V = K(\sqrt{P})^\alpha \quad (4)$$

여기서 P 는 전력의 입력 범위이고, V 는 출력 전압이다.

[그림 3]과 같이 -20 dBm 이하의 Square Law 영역에서 α 는 2에 근접하게 된다. 그 이상의 높은 전력 레벨에서 다이오드의 임피던스는 전력에 따라 변하고, α 는 0.8 정도의 작은 값을 갖게 된다.

3-5 프로브의 비선형성 보상

[그림 1(b)]와 같이 다이폴 급전점에 있는 검파 다이오드는 센서의 출력 전압을 정류하고, 정류된 신호는 T/L을 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



[그림 3] 입력 전력에 따른 검파의 상관관계

다이오드의 DC 전압은 식 (5)와 같이 제곱항을 더해 보상한다.

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

DCP는 V_{out} 가 예상 정류 DC 전압값의 50%일 때 정해진다. 이때 보정된(보상된) 전압은 V_{out} 가 DCP와 같을 때, V_{out} 값의 두 배이다. 일반적으로 Low-barrier 실리콘 쇼트키 다이오드의 정류된 출력 전압인 DCP는 100 mV 정도이다^[1]. 이것으로서 전기장의 세기가 큰 조건에서 SAR 값이 실제보다 적게 측정되는 것을 보상해준다.

IV. 전기장 프로브의 교정

전계 프로브의 교정은 자유 공간에서의 프로브의 민감도와 매질에서의 프로브의 민감도(변환 계수: CF)를 구하는 두 가지 단계를 적용한다. 총 전기장은 아래 식 (6)과 같다.

$$|E|^2 = \sum_{i=1}^3 |E_i|^2 = \sum_{i=1}^3 \frac{f_i(V_i)}{\eta_i \gamma_i} \quad (6)$$

여기서 E_i 는 i -축 방향으로의 전기장 세기, V_i 는 정

류 신호, $f(V_i)$ 은 정류된 센서 신호 V_i 의 선형 함수이고, n_i 는 자유 공간에서의 다이폴 센서의 절대 민감도 [$\mu V/(V/m)^2$]이며, γ_i 는 자유 공간에서의 프로브 센서의 민감도에 대한 매질에서의 프로브 센서의 민감도의 비이고 이를 흔히 변환계수(CF: Conversion Factor)로 부른다.

4-1 자유 공간에서의 민감도 평가(첫번째 단계)

도파관은 자유 공간에서 잘 정의된 표준 전자기장의 생성에 이용되는 비교적 정확한 장치이다.

도파관을 사용하는 이유는 다음과 같다.

- 1) 도파관을 사용하면 전력 소모가 적고, 원거리 장 교정 장치보다 적은 공간을 한다.
- 2) 전자계 값을 추적할 수 있는 정확한 전자기장의 생성이 가능하다.
- 3) 도파관의 크기가 프로브의 치수보다 비교적 커서 프로브 삽입으로 인한 전자기장 교란에 의해 발생하는 어려움은 무시할 수 있다.
- 4) 프로브 축 방향을 전자기장 편파에 수직 또는 평행하도록 용이하게 놓을 수 있다.
- 5) 그 밖에도 주파수가 겹치도록 도파관 2종을 사용하여 일반적인 전자기장 세기를 상호 비교하여 검증할 수 있다.

비교적 낮은 주파수(750 MHz 미만)에서는 도파관의 부피가 커져 쉽게 이용할 수 없어, 대신에 TEM 셀이 이용된다. 프로브는 일반적으로 도파관(또는 TEM 셀)의 격벽에 있는 작은 구멍을 통해 삽입되며, 도파관(혹은 TEM 셀) 내부에서는 프로브 센서부 전체에 걸쳐 거의 균일한 전자기장이 만들어지는 중앙에 배치된다. 각 센서는 센서와 평행한 전기장 성분에 대하여 평가된다. 3,000 MHz 이상의 높은 주파수에서는 프로브의 존재로 인해 발생하는 도파관에서 전자기장 교란이 측정 에러의 무시할 수 없는 요인이며, 자유 공간 표준 전자기장 방법이 교정에 이용된다.

4-2 매질내에서의 민감도 평가(두번째 단계)

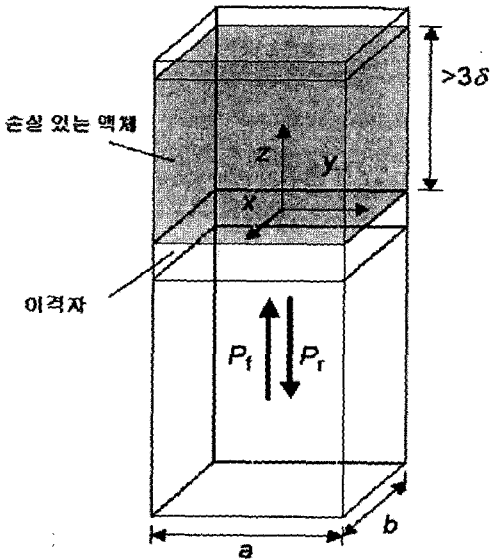
매질에서의 민감도는 매질내에서 국부적으로 알려진 전자기장 값을 생성함으로써 결정된다. 도파관을 이용한 교정과 온도 프로브를 이용한 교정, 크게 두 가지로 분류하지만, 온도 프로브를 이용한 교정은 언급하지 않겠다.

도파관(해석적 전자기장)을 이용한 교정 방법에서는 다른 물리적인 크기(예를 들면 입력 전력)를 측정하여 전자기장을 해석적으로 계산할 수 있는 시험 장치를 이용한다. 그것은 공기 중에서의 프로브 교정을 위한 표준 전자기장 방법에 일치한다. 그러나 손실있는 액체에서의 전자기장에 대해 정의된 표준은 없다.

프로브 교정을 위해 손실있는 액체에서의 계산된 전자기장을 이용할 때 불확정도의 평가에서 몇 가지 요점을 고려하여야 한다.

- 1) 장치는 입사 전력의 정확한 결정을 가능케 하여야 한다.
- 2) 계산된 전자기장 세기의 정확성은 액체의 유전 파라미터 값에 의존된다.
- 3) 높은 유전율을 가진 액체에서는 파장이 짧기 때문에 작은 장치라 하더라도 공진 차단 주파수 이상이 될 수도 있다. 이 장치에서의 전자기장 분포가 이론적인 전자기장 분포와 일치하는지 신중하게 검사하여야 한다.

액체가 담긴 구형(矩形) 도파관은 횡단면의 전자기장 분포가 반사에 의존하지 않는 시스템이다. 그것은 모의 액체 조직 내에서 해석적으로 알려진 전자기장 생성에 활용될 수 있다. 도파관은 개방된 상 위 부분은 액체로 채우고, 급전 결합기로부터의 한 파장(λ) 이상 떨어져 있는 유전박판(dielectric slab)은 공기와 액체 사이의 임피던스 정합(반사 손실 10 dB 이상)을 제공한다. 대칭적 구조와 액체에서의 높은 손실에 의하여 모의 액체 조직 내의 전자기장 분포가 TE₁₀ 패턴을 따르도록 해주지만 고차 모드도



- x, y, z : 좌표의 축
- 3δ : 액체 깊이(표면 깊이의 3배 초과)
- a : 도파관 단면의 폭
- b : 도파관 단면의 높이
- P_i : 입사 전력
- P_r : 반사된 전력

[그림 4] 구형 도파관을 이용한 민감도(변환 인자) 평가 장치도

이론적으로는 존재할 수 있다. 그것은 액체 체적 내를 스캔하여 정밀하게 타당성 검증을 받았는데, 그것은 이론적인 TE_{10} 패턴으로부터 $<\pm 2\%$ 미만의 편차를 보여준다^[5]. [그림 4]는 구형 도파관을 이용한 민감도(변환 인자) 평가 장치도이다.

액체 내에서, 낮은 차단 주파수로 인해 장은 거의 TEM 파처럼 전파된다. 액체의 상위 표면에서의 반사는 무시할 정도로 작도록 매질 깊이(표피 두께의 3배 이상)를 선택하고, 액체에 흡수된 전력은 도파관 내의 순방향 전력과 반사 전력을 측정함으로써 평가되며, 아래에 식 (7)이 주어진다.

$$SAR(z) = \frac{4(P_i - P_r)}{\rho ab \delta} e^{-2z/\delta} \quad (7)$$

여기서

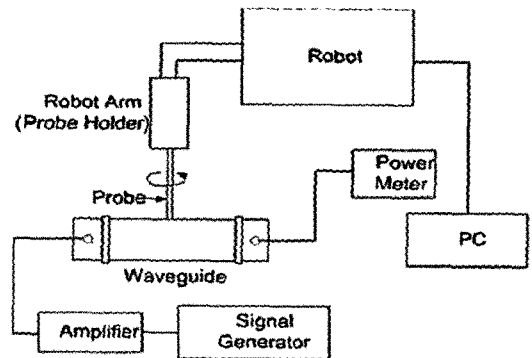
- ab 는 도파관의 단면적
- P_i 는 도파관의 순방향 전력
- P_r 는 도파관으로부터의 반사 전력
- z 는 다이폴 중심의 세로 축 좌표
- ρ 는 액체 밀도
- δ 는 손실이 있는 액체 내부에서의 침투 깊이이다.
- 주) 본 측정 절차에서 밀도 ρ 는 $1,000 \text{ kg/m}^3$ 으로 정의한다.

V. 등방성 평가

5-1 축 등방성

프로브는 프로브의 축에 대해 수직으로 입사하는 기준파에 노출되어야 한다. 축 등방성은 15도 이하의 간격으로 0도에서 360도까지 주축을 따라서 프로브를 회전시킴으로써 결정된다. [그림 5]는 자유 공간에서의 축 등방성 평가를 위한 장비 구성도이다. 평가 방법은 아래와 같다.

- 1) 프로브를 TEM 셀 또는 도파관의 벽에 있는 작은 구멍을 통하여 삽입된다.
- 2) 전기장이 프로브의 전체 크기에 걸쳐서 거의 균일한 부분의 중앙에 프로브의 센서부를 위



[그림 5] 자유 공간에서의 축 등방성 평가를 위한 장비 구성도

치시킨다.

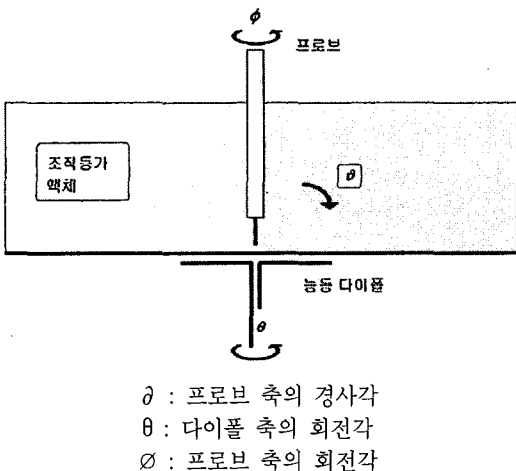
- 3) 프로브를 프로브의 회전축을 중심으로 15도이하의 간격으로 360도 회전시킨다.
- 4) 각 센서는, 센서와 평행한 전기장 성분에 대하여 평가되며, 측정된 평균값으로부터 최대 편차로 표시한다.

5-2 반구 등방성 평가

5-2-1 플랫폼(Flat Phantom)의 아래에 다이폴 안테나를 위치시킨 등방성 평가 방법

[그림 6]은 플랫폼의 아래에 다이폴 안테나를 위치시킨 반구 등방성을 평가하는 장치이다. 거치대에 장착된 반파장 다이폴을 모의 인체 용액으로 가득 채워진 플랫폼 밑에 바닥과 평행하게 설치한다. 프로브는 다이폴 급전점 위에 수직으로 삽입하고, 회전하는 프로브의 모든 위치는 정밀하게 제어한다. 평가 방법은 아래와 같다.

- 1) 반파장 다이폴을 조직 등가 액체가 가득 채워진 플랫폼 아래에 바닥과 평행하게 설치하고, 프로브는 다이폴 급전점 위에 수



[그림 6] 플랫폼의 아래에 다이폴을 위치시킨 반구 등방성 평가 장치

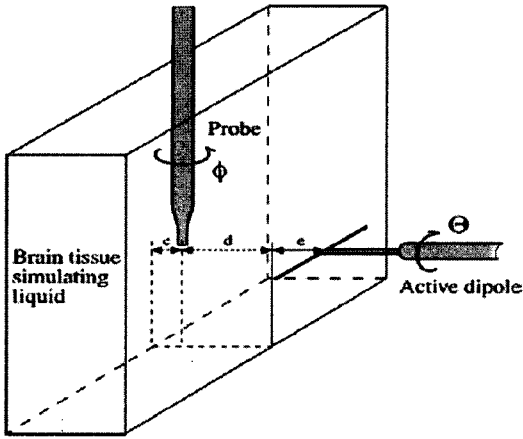
직으로 삽입한다.

- 2) 다이폴은 다이폴 안테나의 축을 중심으로 30도 이하의 간격으로 0도에서 180도까지 회전되어야 한다.
- 3) 프로브 축의 경사각은 0도에서 75도까지 변화시킨다.
- 4) 프로브는 로봇에 의해 0도에서 360도로 프로브의 회전축 상에서 회전되며, 15도 이하의 간격마다 측정 데이터가 기록된다.
- 5) 구면 등방성으로부터의 편차는 측정된 모든 프로브 위치 중에서 평균값으로부터의 최대 SAR 편차로 표시된다.

5-2-2 다이폴과 플랫폼을 이용한 등방성 평가

[그림 7]의 장치는 시험 주파수에서 작동하는 반파장 공진 다이폴, 모의액체 조직으로 채워진 플라스틱 상자 구성되며, 다이폴과 플랫폼을 이용하여 반구 등방성을 측정하는 장치이다. 프로브의 반구 등방성의 평가는 아래와 같다.

- 1) 테이블 위에 다이폴 안테나를 장착하고 그것을 플랫폼과 평행하게 배치한다.
- 2) 안테나는 모의 용액이 채워진 얇은 플라스틱 상자 근접한 벽으로부터 거리가 최대 $e = \lambda/10$ 가 되도록 한다.
- 3) 세 개의 프로브 센서의 중심이 다이폴 축의 연장선에 위치하도록 하고, 프로브를 액체에 수직으로 삽입한다.
- 4) 프로브의 수평 위치는 가능한 한 모의 인체의 뒷부분 근처에서 정재파가 최대인 곳에 있어야 하며, 모의 인체와 액체의 경계면으로부터 거리 d 만큼 이격(離隔)시킨다. 이때 전기장은 부분적으로 균일하며 자기장은 최소값을 가져야 한다.
- 5) 다이폴은 다이폴의 회전축을 중심으로 30도 이하의 간격으로 0도에서 90도까지 회전시킨다.

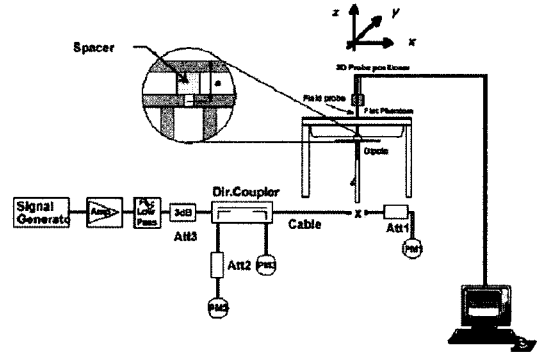


[그림 7] 다이폴과 플랫폼을 이용한 반구 등방성 평가 장치

- 6) 프로브의 회전은 로봇에 의해 제어되는데, 0도에서 360도까지 프로브의 회전축을 중심으로 회전되며, 측정 데이터는 각 15도 이하의 간격마다 기록된다.
- 7) 반구 등방성으로부터의 편차는 측정된 모든 프로브 위치 중에서 평균값으로부터의 최대 SAR 편차로 표시된다.

VI. 시스템 성능 검사

SAR 측정 시스템은 고주파의 근거리 장을 측정하므로 측정 오차가 매우 커질 수 있다. 따라서 프로브를 교정한 후 SAR 측정 시스템을 구성하여 시스템 성능 검사로 확인할 수 있다. 성능 검사는 1 gram SAR 값, 10 gram SAR 값을 체크하며, 프로브의 플랫폼 경계면 근접 효과(Boundary Proximity Effect)에 대한 extrapolation routine을 검증하기 위한 peak point SAR 값을 체크하게 된다. 시스템 성능 검사는 1 gram 또는 10 gram 평균 SAR 측정으로 완료되며, 측정된 1 gram 또는 10 gram 평균 SAR 값은 다이폴의 정규 입력 전력 (1 Watt)으로 정규화되며, 시스템 검사 목



[그림 8] 시스템 성능 검증 구성도

<표 1> 성능 검증 기준 SAR 값

주파수 (MHz)	1 g SAR [W/kg]	10 g SAR [W/kg]	Local SAR at surface (above feed point)
300	3.0	2.0	4.4
450	4.9	3.3	7.2
835	9.5	6.2	14.1
900	10.8	6.9	16.4
1450	29.0	16.0	50.2
1800	38.1	19.8	69.5
1900	39.7	20.5	72.1
2000	41.1	21.1	74.6
2450	52.4	24.0	104.2
3000	63.8	25.7	140.2

표값의 $\pm 10\%$ 이내에 있어야 한다. 시스템 성능 검증 구성도는 [그림 8]과 같다.

<표 1>은 기준 다이폴 및 플랫폼에 대한 해석적인(FDTD) 기준 SAR 값이며, 1 W 입사 전력으로 정규화(normalize) 되었으며, IEEE Std 1528TM-2003에 나타나 있다^[1].

참고 문헌

- [1] IEEE Std 1528TM-2003, IEEE Recommended practice for determining the peak spatial-average Speci-

fic Absorption Rate(SAR) in the human head from wireless communications devices; Measurement techniques, *IEEE Standard Coordinating Committee* 34, Dec. 2003.

- [2] Youn-Myoung Gimm and 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, D.C., pp. 749-754, 2000.
- [4] Agilent Technologies, Application Note 986.
- [5] K. Pokovic, "Advanced electromagnetic probes for near-field evaluation", *Doc. Tech. Sci. Diss. ETH Nr. 13334*, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland, 1999.

≡ 필자소개 ≡

김 윤 명



1975년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)

1977년 2월: 한국과학원 전기 및 전자공학과 (공학석사)

1990년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)

1980년~현재: 단국대학교 전자공학과

교수

[주 관심분야] 전자파공학