

# Micro-TEM Cell을 사용한 표준 전자기장의 발생 및 측정불확도 평가

## Standard Field Generation Using a Micro-TEM Cell and Its Measurement Uncertainty Evaluation

강진섭 · 김정환 · 강웅택 · 강노원 · 강태원

Jin-Seob Kang · Jeong-Hwan Kim · Ung-Taek Kang · No-Weon Kang · Tae-Weon Kang

### 요 약

본 논문에서는 micro-TEM cell을 사용한 표준 전자기장 발생법을 기술하고 측정불확도를 평가하였다. 표준 전자기장 발생 시스템은 auto-leveling 기능을 가진 신호발생부, 최대 1.2 GHz까지 동작하는 micro-TEM cell, 서미스터 마운트를 사용한 전력측정부로 구성된다. 표준 전자기장 발생법의 타당성을 보이기 위해 10 MHz~1 GHz 대역에서 전자기장의 세기 20 V/m에 대해 실시된 전자기장의 세기 국제비교(CCEM.RF-K20)의 참여 결과를 제시하였다.

### Abstract

In this paper, a standard field generation method using a micro-TEM cell is described and its measurement uncertainty is evaluated. The standard field generation system consists of an auto-leveling signal source, a micro-TEM cell operating up to 1.2 GHz, and a power measuring instrument using a thermistor mount. Measurement results of a field strength key comparison (CCEM.RF-K20) for the field strength of 20 V/m at frequencies between 10 MHz and 1 GHz are presented for validating the standard field generation method.

Key words : Field Strength, Micro-TEM Cell, Standard Field Generation

### I. 서 론

산업 사회가 급속히 발전함에 따라 많은 전기/전자 관련 시스템, 부품, 소자 등이 RF 및 초고주파 대역에서 사용되고 있으며, 우리나라에서는 1996년부터 이들에 대한 전자기 내성 규제<sup>[1]</sup>가 시행되고 있다. 전자기 내성 시험용 전자파 무향실 내에서 전자기장 발생 및 피측정기기(DUT: Device Under Test)가 놓이는 위치에서 전자기장의 세기 및 균일도(field uniformity) 평가에는 각종 안테나 및 probe가 사용되고 있으며, 전자기장의 세기 국가측정표준에

의하여 그 특성이 평가되어야 한다.

RF 및 초고주파 주파수 영역에서 표준 전자기장 발생 시스템으로는 micro-TEM cell, TEM cell, OEG (Open-Ended WaveGuide) 및 혼(horn) 안테나가 일반적으로 사용되고 있다. 현재 우리나라의 국가측정표준대표기관(NMI: National Metrology Institute)인 한국표준과학연구원(KRISS: Korea Research Institute of Standards and Science)에서 보유하고 있는 표준 전자기장 발생 시스템은 표 1과 같다. OEG 및 혼 안테나를 사용해서 표준 전자기장을 발생시키기 위해서는 막대한 설비 비용이 소요되는 전자파 무향실이 필요하

한국표준과학연구원 기반표준부 전자파센터(Center for Electromagnetic Wave, Division of Physical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science(KRISS))

· 논문 번호 : 20081112-144

· 수정완료일자 : 2009년 1월 9일

표 1. KRISS의 표준 전자기장 발생 시스템  
Table 1. Standard field generation systems at KRISS.

| 표준 전자기장 발생 시스템 | 동작 주파수 대역                  |
|----------------|----------------------------|
| Micro-TEM cell | dc~1.2 GHz                 |
| TEM cell       | dc~0.15 GHz<br>dc~0.25 GHz |
| OEG            | 0.2 GHz~1.1 GHz            |
| 혼 안테나          | 0.4 GHz~18 GHz             |

다. 수백 MHz 이상의 주파수 영역에서는 구조가 간단하고 해석이 용이하며 이득이 높은 혼 안테나가 표준 전자기장 발생 안테나로 사용되고 있으나, 수백 MHz 이하의 주파수 영역에서는 혼 안테나의 개구면 크기가 매우 커지므로 표준 전자기장 발생 안테나로 사용하기 적합하지 않다. 이런 경우에는 혼 안테나 대신에 한쪽 면은 단락(short)되고, 다른 한쪽 면이 개방된 구형(rectangular) 도파관인 OEG가 표준 전자기장 발생 안테나로 많이 사용되고 있으나, OEG 역시 300 MHz 이하의 저주파수 대역에서는 크기가 너무 커서 실용적이지 못하다.

일반적으로 dc~수백 MHz 대역에서 표준 전자기장 발생에는 TEM cell이 널리 사용되고 있으며, 그 특징은 다음과 같다<sup>[2]</sup>.

- 1) 외부 전자파에 의한 간섭이 차폐되는 밀폐형 장치(shielded enclosure)이다. 휴대가 가능하고 구축 비용이 많이 드는 전자파 무향실이 필요하지 않으므로 구축 비용이 저렴하다.
- 2) TEM cell 내에서 발생하는 전자기장의 세기는 TEM cell의 기하학적인 크기에 의해 결정되므로, 전자파 무향실에서 OEG나 혼 안테나를 사용한 전자기장 발생법보다 TEM cell을 사용한 전자기장 발생법이 더 정확한 전자기장을 발생시킬 수 있다.
- 3) dc에서부터 첫 번째 고차 모드가 나타나는 공진(resonance) 주파수까지 사용이 가능하며, 일반적으로 TEM cell 크기가 작아지면 공진 주파수가 높아진다.
- 4) 안테나를 사용하지 않으므로 보다 넓은 주파수 영역에서 사용할 수 있으며, 근거리장(near-field region)/원거리장(far-field region) 구분이 없다.

5) 밀폐형 장치이므로 DUT를 넣고 평가할 수 있는 시험 영역 크기가 제약을 받아서, DUT의 크기가 너무 크면 사용할 수 없다. 일반적으로 DUT의 크기는 septum과 도체 바닥면 사이 거리의 1/3 보다 작아야 한다.

만약 DUT의 크기가 작다면 TEM cell이 작아도 되므로 공진 주파수가 증가하고 소형이므로 정밀 제작이 가능하여 표준 전자기장을 보다 정확하게 발생시킬 수 있다. 이런 목적으로 제작된 것이 micro-TEM cell이다. 정밀 제작된 micro-TEM cell을 사용하여 광대역에서 정확한 표준 전자기장을 발생시켜 높은 정확도로 소형 probe를 평가할 수 있다<sup>[3]</sup>. 또한, 평가된 probe를 사용하여 광대역에서 높은 정확도로 전자기장의 세기를 측정할 수 있어 TEM cell이나 OEG 및 혼 안테나를 사용한 다른 표준 전자기장 발생 시스템을 평가할 수도 있다<sup>[4]</sup>. 한편, TEM cell보다 광대역 특성을 가지는 G(Gigahertz)-TEM cell을 micro-TEM cell로 평가된 광대역 소형 probe로 평가하고, 그 G-TEM cell을 표준 전자기장 발생 시스템으로 사용하려는 연구도 수행되고 있다<sup>[5]</sup>.

일반적으로 산학연에서 사용되는 계측기는 국가 측정 표준에 소급성(traceability)을 갖도록 관련 측정량에 대해 교정을 받아 사용되므로, 관련 측정량에 대한 산학연의 측정 불확도는 NMI의 측정 능력에 의해 결정된다. 따라서 NMI는 관련 분야의 측정량에 대해 최고의 측정 능력을 확보할 필요가 있다. 한편, 구축된 측정 시스템으로 얻은 결과에 신뢰 정도를 부여하기 위해서는 관련 시스템의 측정 불확도를 평가할 필요가 있으나, 전자기장의 세기 분야에서 (micro-)TEM cell을 사용한 표준 전자기장 발생 시스템의 경우 아직까지 국내에는 관련 시스템에 대한 측정 불확도 분석 사례가 보고된 바 없다.

본 논문에서는 보다 정확히 예측가능한(calculable) 표준 전자기장을 발생시키기 위해 채택된 micro-TEM cell을 사용한 표준 전자기장 발생법을 기술하고 관련된 측정불확도 평가 과정을 소개하였으며, 그 타당성을 보였다. 이를 위해 II절에서는 micro-TEM cell을 사용한 표준 전자기장 발생 시스템, 발생된 표준 전기장의 세기 계산, 측정 불확도를 기술하였다. III절에서는 기술된 표준 전자기장 발생법의 타당성을 보이기 위해 10 MHz~1 GHz 대역에

서 전자기장의 세기 20 V/m 에 대해 실시된 전자기장의 세기 국제비교(CCEM.RF-K20)의 참여 결과를 제시하고, IV절에서는 논문 내용을 요약하였다.

## II. 표준 전자기장 발생

### 2-1 표준 전자기장 발생 시스템 구성

일반적으로 micro-TEM cell을 사용한 표준 전자기장 발생 시스템은 크게 세 부분, 즉 신호발생부, micro-TEM cell, 전력측정부로 구성된다. 신호발생부 및 전력측정부는 다양한 방법으로 구성할 수 있으며, 보다 정확히 예측가능한 표준 전자기장을 발생시키기 위해 채택된 시스템은 그림 1과 같다. 신호원의 출력과 주파수는 PC를 통해 조정하고 신호원의 출력이 power splitter를 통해 monitor 단자(step attenuator 단자)와 micro-TEM cell 연결 단자로 거의 같게 분배된다. Monitor 단자에 연결된 서미스터 마운트(thermistor mount)와 power level control unit는 신호원에 전력 안정화 신호를 인가해 주어 monitor 단자와 micro-TEM cell 연결 단자에 인가되는 전력의 크기를 일정(auto-leveling)하게 하는 역할을 한다. 구성된 시스템에서는 출력 신호 크기를 미세하게 조절할 필요가 있어 서미스터 마운트에 인가되는 신호를 step attenuator를 사용하여 0.1 dB step으로 조절하고 power

level control unit의 bias 전압을 dc calibrator를 사용하여 조절하였다. Micro-TEM cell에 공급되는 전력 측정에는 서미스터 마운트가 사용되었으며, 서미스터 마운트에 연결된 전력계(power meter)의 출력 dc 값은 DVM(Digital Voltmeter)을 사용하여 측정하였다. 그리고 micro-TEM cell에는 원하는 크기의 전자기장(약 20 V/m)을 발생시키면서, 동시에 서미스터 마운트에는 정격전력(약 10 mW)보다 작은 전력을 인가하기 위해 micro-TEM cell과 전력측정부 사이에는 3 dB 감쇠기가 사용되었다.

### 2-2 발생된 표준전기장의 세기 계산

서미스터 마운트에서 전력  $P$ 가 측정되었을 때, probe가 위치하는 micro-TEM cell의 중앙에서 발생하는 전자기장의 세기  $E$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다<sup>[2]</sup>.

$$E = \sqrt{\frac{PZ}{A}} \frac{1}{d} \quad (1)$$

여기서  $Z$ 와  $d$ 는 micro-TEM cell의 특성 임피던스 및 septum과 도체 바닥 면 사이의 거리를 각각 의미한다. 또한,  $A$ 는 probe가 위치하는 micro-TEM cell의 중앙에서 전력 측정용 서미스터 마운트의 입력단까지의 감쇠 효과를 고려한 감쇠상수로서 micro-TEM cell 내부에서의 전파 손실 및 3 dB 감쇠기에 의한 감

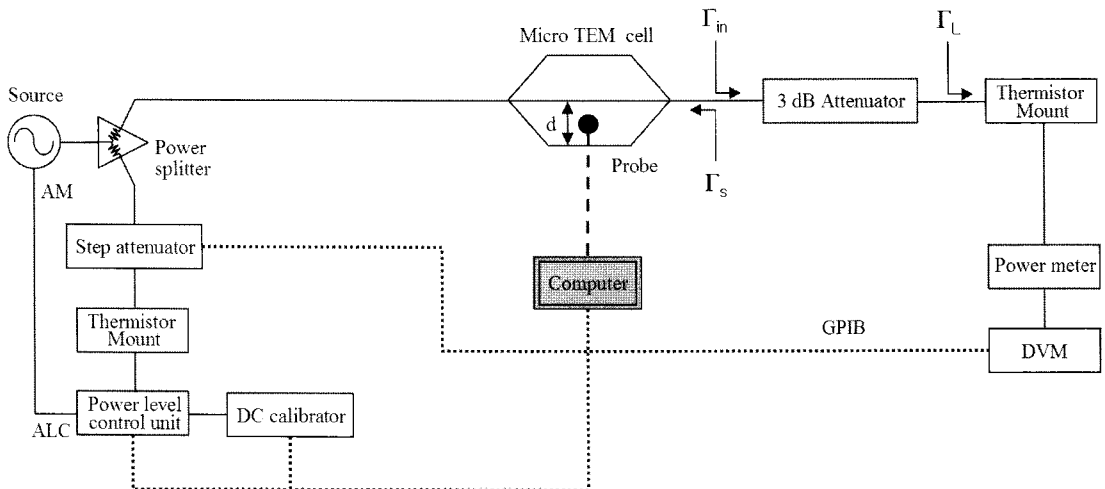


그림 1. Micro-TEM cell을 이용한 표준 전자기장 발생 시스템  
Fig. 1. Standard field generation system using a micro-TEM cell.

최 효과(transducer power gain)<sup>[6]</sup>의 곱으로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$A = e^{-\alpha \frac{L_{eff}}{2} \sqrt{f_{GHz}}} \frac{|S_{21}|^2 (1 - |\Gamma_s|^2)(1 - |\Gamma_L|^2)}{|1 - S_{22}\Gamma_L|^2 |1 - \Gamma_s\Gamma_{in}|^2} \quad (2)$$

여기서  $\alpha$ 와  $L_{eff}$ 는 각각 micro-TEM cell 내부에서의 전송 손실 및 유효 길이를 의미하고,  $f_{GHz}$ 는 GHz 단위로 표현된 주파수로 표피 효과에 의한 손실을 모델링하기 위한 것이고,  $S_{ij}$ 는 3 dB 감쇠기의 산란 계수를,  $\Gamma_L$ 은 서미스터 마운트의 반사계수를 의미하며,  $\Gamma_s$ 와  $\Gamma_{in} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_L}{1 - S_{22}\Gamma_L}$ 는 각각 micro-TEM cell과 3 dB 감쇠기 연결점에서 micro-TEM cell과 감쇠기를 들여다 본 반사계수를 의미한다.

최대 1.2 GHz까지 동작하는 micro-TEM cell의 단면 치수로부터 계산된 특성임피던스  $Z$ 는 50.319  $\Omega$  이고, septum과 도체 바닥 면 사이의 거리  $d$ 는 0.0342 m이었으며, micro-TEM cell의 산란계수로부터 얻은  $\alpha$ 와  $L_{eff}$ 는 각각 0.0231 (m)<sup>-1</sup>과 190.2417 mm이었다.

서미스터 마운트에서 측정되는 전력  $P$ 는 신호원 출력을 off-on-off 하면서 서미스터 마운트에 연결된 전력계(power meter)의 출력전압을 DVM으로 측정하여 알 수 있으며, 사용되는 식<sup>[7]</sup>은 다음과 같다.

$$P = \frac{(V_m^{off} + V_c^{on} - V_c^{off})^2 - (V_m^{on})^2}{200\eta_e} \quad (3)$$

사용된 서미스터 마운트 내부에는 두 개의 서미스터가 있어 하나는 전력 측정에 사용되고, 다른 하나는 주위 온도 변화에 의한 특성 drift를 측정하는데 사용된다. 식 (3)에서  $\eta_e$ 는 서미스터 마운트의 실효 효율을 의미하며,  $V_m^{off}$ 과  $V_m^{on}$  및  $V_c^{off}$ 과  $V_c^{on}$ 는 각각 신호원의 출력이 off와 on이 되었을 때 전력 측정에 사용되는 서미스터와 특성 drift 측정용 서미스터에 연결된 브리지의 출력 전압을 의미한다.

한편, 전력 측정에 사용된 서미스터 마운트의 실효 효율 및 반사계수의 측정값은 표 2와 같다. 실효 효율은 미소 열량계를 사용하여 측정하였으며, 반사계수는 offset open과 offset short를 반사 표준으로 사용하고 길이가 다른 여러 개의 기준 air line을 임피던스 표준으로 사용한 동축형 부하의 임피던스 정밀 측정법<sup>[8]</sup>으로 측정하였다. 측정 과정에는 air-gauging

표 2. 서미스터 마운트의 실효 효율 및 반사계수  
Table 2. Effective efficiency and reflection coefficient of thermistor mount.

| 주파수 [MHz] | 실효 효율 ( $\eta_e$ ) | 반사계수     |           |
|-----------|--------------------|----------|-----------|
|           |                    | 실수부      | 허수부       |
| 10        | 0.9998             | 0.000384 | -0.001697 |
| 30        | 0.9994             | 0.000399 | 0.001241  |
| 50        | 0.9991             | 0.001010 | 0.003276  |
| 100       | 0.9984             | 0.001864 | 0.006893  |
| 200       | 0.9972             | 0.004735 | 0.013068  |
| 300       | 0.9966             | 0.008731 | 0.018614  |
| 400       | 0.9959             | 0.014196 | 0.023384  |
| 500       | 0.9953             | 0.021124 | 0.027134  |
| 600       | 0.9945             | 0.029139 | 0.029645  |
| 700       | 0.9939             | 0.038032 | 0.030430  |
| 800       | 0.9933             | 0.047647 | 0.029216  |
| 900       | 0.9927             | 0.057824 | 0.025975  |
| 1,000     | 0.9921             | 0.068507 | 0.020513  |

시스템을 사용하여 비접촉 방식으로 측정된 기준 air line의 직경 값을 손실이 있는 동축 선로 해석법에 적용하여 해석적으로 얻은 기준 air line의 특성 임피던스와 전파상수<sup>[9]</sup>가 사용되었다.

### 2-3 측정불확도 분석

측정불확도는 측정 결과와 관련하여 측정량을 합리적으로 추정한 값의 분산 특성을 나타내는 파라미터로 정의되며, 참값이 놓이는 구간을 표시한다<sup>[10]</sup>. 측정불확도는 일련의 측정값을 통계적으로 분석하여 얻을 수 있는 A형 표준불확도와 통계적 분석이 아닌 다른 방법(예를 들어 제작자 사양, 교정성적서나 기타 인증서에 주어진 자료, 개인적 경험을 통해 추론된 한계치 등)으로 얻을 수 있는 B형 표준불확도로 구분되며, 이 두 성분을 합성하여 합성표준불확도를 얻는다.

Micro-TEM cell을 사용한 표준 전자기장 발생 시스템의 합성표준불확도는 A형 성분  $u(E_i)$ 과 B형 성분  $u(Method)$ 로 구성되며

$$u_c = \sqrt{u^2(E_i) + u^2(Method)} \quad (4)$$

B형 성분은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$u^2(\text{Method}) = u^2(\text{System}) + u^2(\text{Position}) + u^2(\text{SWR}) \quad (5)$$

여기서  $u(\text{System})$ 는 micro-TEM cell을 사용한 표준 전자기장 발생 시스템의 불확도를 의미하고,  $u(\text{Position})$ 는 probe의 위치 부정확성에 의한 전자기장의 세기의 불확도를 의미하며,  $u(\text{SWR})$ 는  $Z \neq 50 \Omega$  일 때 micro-TEM cell 내에 발생하는 정재파로 인한 전자기장의 세기의 불확도를 각각 의미한다.  $u(\text{System})$ 는 식 (1)을 전미분(total differential)하여 다음과 같이 표현할 수 있으며

$$u^2(\text{System}) = E^2 \left( \left[ \frac{u(P)}{2P} \right]^2 + \left[ \frac{u(Z)}{2Z} \right]^2 + \left[ \frac{u(A)}{2A} \right]^2 + \left[ \frac{u(d)}{d} \right]^2 \right) \quad (6)$$

여기서  $E$ 는 micro-TEM cell에 발생된 전자기장의 세기(여기서는 20 V/m)를 의미하고,  $u(P)$ ,  $u(Z)$ ,  $u(A)$ ,  $u(d)$ 는 각각 전력, 특성 임피던스, 감쇠상수, septum과 도체 바닥 면과의 거리에 대한 측정불확도를 의미한다.

### III. 국제비교 참여 결과

#### 3-1 CCEM.RF-K20

일반적으로 NMI가 한 측정량의 측정표준을 확립한 후, 그 측정표준을 대외적으로 유효하게 사용하기 위해서는 국제도량형위원회(CIPM: International Committee for Weights and Measures)의 자문위원회(CC: Consultative Committee), 또는 지역측정협의기구(RMO: Regional Metrology Organization)가 주관하여 시행되는 관련 분야의 국제비교(KC: Key Comparison)에 참여하여 국제적 동등성을 확보해야 한다.

CIPM 산하의 전기자기자문위원회(CCEM: Consultative Committee for Electricity and Magnetism)에서 선정한 전자파 분야 7 개의 주요 측정량(임피던스, 전력, RF 전압, 감쇠량, 잡음전력, 안테나특성, 전자기장의 세기) 중 하나인 전자기장의 세기에 대한 각 나라의 측정표준들 사이의 동등성을 확보하기 위해 CCEM의 전자파분야 작업반(working group)인 GT-RF에서는 1990년부터 1998년 사이에 전자기장의 세기 국제비교(International Comparison GT/RF 86-1 (CCEM.RF-K7.a.F.1, 2) Electric Field Strength: 27 MHz to 10

GHz)<sup>[11]</sup>를 실시하였다. 이 국제비교에는 KRISS를 포함하여 모두 8개의 NMI가 참여하였으며, 이동표준기로는 100 MHz tuned dipole, 5-cm dipole(27 MHz ~ 1,000 MHz), 8-cm resistively loaded dipole(0.3 ~ 10 GHz)이 사용되었다. 또한, 1999년부터 2004년까지의 기간동안 CCEM은 유럽의 8개 NMI가 참여한 EUROMET Project No. 520(Comparison of Electrical Field Strength Measurement)에 KRISS와 호주 및 러시아의 NMI인, CSIRO(Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization)와 VNIIFTRI (National Research Institute for Physical-Technical and Radio Engineering Measurements)가 추가로 참가한 국제비교(Electrical field strength measurements at frequencies between 10 MHz and 1 GHz(CCEM.RF-K20))<sup>[12]</sup>를 실시하였다.

CCEM.RF-K20에서는 각 참여기관의 표준 전자기장 발생 시스템 내에 이동표준기를 위치시킨 후 이동표준기의 구동 프로그램을 사용하여 PC에서 읽은 측정값이 (20±0.5) V/m 범위 내에 있게 되었을 때 PC에서 읽은 값과 실제 발생시킨 전자기장의 세기 및 측정불확도를 보고하는 것으로, 관련 protocol은 표 3과 같다<sup>[12]</sup>. 사용된 이동표준기는 두께 2 mm, 직경 12 mm thin-disk 형태의 선형편파 전계 probe로, 수신된 RF 신호 세기에 대응되는 dc 신호를 광신호로 변환하여 출력하도록 된 것이다(그림 2).

#### 3-2 측정결과

KRISS에서는 II 절에서 기술한 micro-TEM cell을 사용한 표준 전자기장 발생 시스템을 사용하였다. 이동표준기의 구동 프로그램을 사용하여 PC에서 읽은

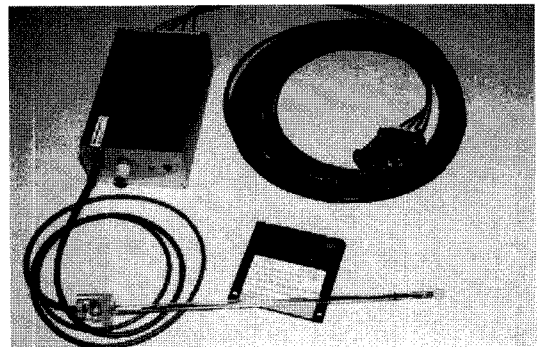


그림 2. CCEM.RF-K20의 이동표준기 사진  
Fig. 2. Photo of the traveling standard of CCEM.RF-K20.

표 3. 전자기장의 세기 국제비교 CCEM.RF-K20의 프로토콜

Table 3. Protocol of field strength key comparison CCEM.RF-K20.

|           |  |   |
|-----------|--|---|
| 제목        | Electrical field strength measurements at frequencies between 10 MHz & 1 GHz   |   |
| 참여 기관     | 주관기관   | METAS   |
|           | 참여기관   | PTB, NPL, NMI, STUK, IEN, SP, NML, KRISS, CSIRO, VNIIFTRI                   |
| 이동 표준기 사양 | 품명   | Linearly polarized E-field reference probe (두께 2 mm, 직경 12 mm thin-disk 형태) |
|           | 동작범위   | 15 V/m ~ 100 V/m  |
|           | 동작온도   | 16 °C ~ 30 °C   |
|           | 크기   | 직경 12 mm, 두께 2 mm   |
| 측정 조건     | 온도   | (23±1) °C   |
|           | 측정 주파수   | 10, 30, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1,000 [MHz]        |
| 비교 항목     | 이동표준기 구동 프로그램을 이용해서 PC에서 읽은 측정값이 (20±0.5) V/m일 때 실제 발생시킨 전자기장의 세기  |   |
| 보고 내용     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 표준 전자기장 발생법</li> <li>- 표준 전자기장의 세기 계산방법</li> <li>- 발생시킨 전자기장의 세기 및 측정불확도</li> <li>- 측정온도</li> </ul> |   |

측정값이 20 V/m일 때 10 회 발생된 표준 전자기장의 세기 평균값은 표 4의 두 번째 열과 같다<sup>[12]</sup>.

B형 표준불확도의 각 성분, 즉 전력, 특성 임피던스, 감쇠상수, septum과 도체 바닥 면과의 거리, 이동표준기 프로브 위치, 정재파에 의한 불확도 요인 및 추정 값은 표 5와 같으며, 이들 불확도 요인으로부터 KRISS 측정불확도 표현지침<sup>[10]</sup>에 따라 산출된 측정불확도는 표 4의 세 번째 열과 같다. 300 MHz일 때 상세한 산출 내역은 표 6과 같으며, 한 사례로서 전력(P)에 대한 산출 과정은 다음과 같다. 표 5에서 전력에 대한 측정불확도(u(P)) 요인은 전력 측정에 사용되는 서미스터 마운트의 실효효율(표 2)에 대한 측정불확도로서, 실효효율 0.5 % 불확도에 의한 전력의 측정불확도(u(x<sub>i</sub>))는 표 6에서 0.0245 mW이며,

표 4. KRISS의 측정 결과

Table 4. Measurement results of KRISS.

| 주파수 [MHz] | 전자기장의 세기 [V/m] |             | Probe readout [V/m] | 온도 [°C] |
|-----------|----------------|-------------|---------------------|---------|
|           | 세기             | 측정불확도 (k=1) |                     |         |
| 10        | 20.316         | 0.279       | 20.0                | 22.8    |
| 30        | 20.371         | 0.274       | 20.0                | 22.9    |
| 50        | 20.280         | 0.277       | 20.0                | 22.9    |
| 100       | 20.284         | 0.273       | 20.0                | 22.8    |
| 200       | 20.348         | 0.293       | 20.0                | 22.9    |
| 300       | 20.603         | 0.266       | 20.0                | 22.8    |
| 400       | 20.917         | 0.280       | 20.0                | 22.8    |
| 500       | 21.207         | 0.285       | 20.0                | 22.8    |
| 600       | 21.319         | 0.278       | 20.0                | 22.8    |
| 700       | 21.169         | 0.287       | 20.0                | 22.8    |
| 800       | 20.812         | 0.288       | 20.0                | 22.8    |
| 900       | 20.687         | 0.286       | 20.0                | 22.8    |
| 1,000     | 20.925         | 0.286       | 20.0                | 22.8    |

이 측정불확도에 u(x<sub>i</sub>)가 전자기장의 세기에 기여하는 정도를 나타내는 감도계수(c<sub>i</sub>) 2098.83 V/(m·mW)를 곱하면 전력 측정에 의한 측정불확도(c<sub>i</sub>u(x<sub>i</sub>))는 0.052 V/m이다.

한편, 표 4로부터 그림 1과 같은 micro-TEM cell을 사용한 표준 전자기장 발생 시스템(그림 1)으로 20 V/m 세기의 전자기장의 발생시킬 때 최대 측정불확도가 0.293 V/m(1.47 %)이었다. 또한, 표 6의 다섯 번째 열로부터 알 수 있듯이 측정불확도의 주요 기여 성분이 u(A), u(SWR), u(d)이므로, 표준 전자기장 발생 시스템의 측정불확도를 개선하려면 micro-TEM cell의 특성 임피던스는 개선하기 용이하지 않으므로 감쇠상수 및 septum과 도체 바닥 면과의 거리를 보다 작은 불확도로 측정된 값을 사용하면 된다.

CCEM.RF-K20 최종보고서<sup>[12]</sup>에 수록된 측정 결과 중에서 국제비교 database에 등록되는 측정주파수(30 MHz, 100 MHz, 300 MHz, 900 MHz)의 결과는 그림 3과 같다. 그림 3은 참여기관들의 측정값들로부터 계산된 기준값(KCRV: Key Comparison Reference Value)

표 5. 불확도 요인

Table 5. Sources of uncertainty.

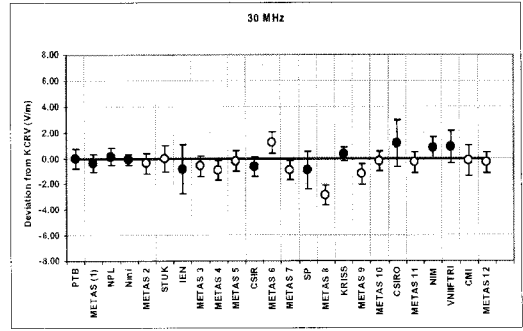
| 기호            | 불확도 성분          | 불확도 요인   | 불확도 값    |
|---------------|-----------------|--|----------|
| $u(P)$        | 전력              | 서미스터 마운트의 실효효율 측정 불확도  | 0.5 %    |
| $u(Z)$        | 특성 임피던스         | 0.15 Ω: 단면치수 측정 불확도<br>0.1 Ω: 이동표준기의 loading 효과<br>0.1 Ω: $d$ 측정 불확도 | 0.35 Ω   |
| $u(A)$        | 감쇠 상수           | 벡터 회로망 분석기의 산란계수 측정 불확도  | 1.5 %    |
| $u(d)$        | Septum과 도체 벽 거리 | 0.1 mm: 계측기 불확도<br>0.1 mm: loading 효과<br>0.1 Ω 주는 $d$ 값              | 0.2 mm   |
| $u(Position)$ | 이동표준기 위치        | 이동표준기 위치가 ±1 mm 변화되었을 때 전자기장의 세기 변화량                                 | 0.05 V/m |
| $u(SWR)$      | 정재파             | $Z=50.319$ Ω으로 인한 정재파 크기   | 0.7 %    |

표 6. 300 MHz에서 측정불확도 산출 내역

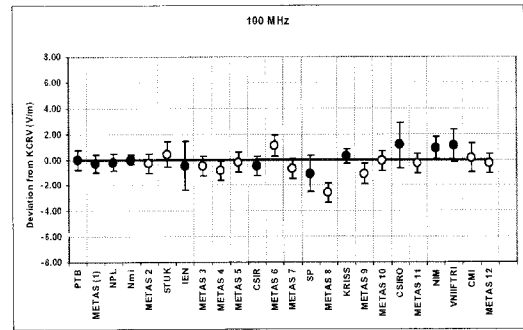
Table 6. Uncertainty budget at 300 MHz.

| 불확도 성분              | 형태 | 불확도 $u(x_i)$ | 감도 계수 $c_i$ | 표준 불확도 $c_i u(x_i)$ [V/m] | 자유도 |
|---------------------|----|--------------|-------------|---------------------------|-----|
| $u(System)$ [V/m]   | B  | 0.215        | 1           | 0.215                     | 57  |
| $u(P)$ [mW]         | B  | 0.0245       | 2098.83     | 0.052                     | 8   |
| $u(A)$              | B  | 0.0076       | -20.42      | -0.155                    | 255 |
| $u(Z)$ [Ω]          | B  | 0.35         | 0.20        | 0.072                     | 8   |
| $u(d)$ [m]          | B  | 0.0002       | -601.17     | -0.120                    | 6   |
| $u(Position)$ [V/m] | B  | 0.05         | 1           | 0.050                     | 5   |
| $u(SWR)$ [V/m]      | B  | 0.1442       | 1           | 0.144                     | 8   |
| $u(E)$ [V/m]        | A  | 0.0337       | 1           | 0.034                     | 9   |
| $U(k=1)$ [V/m]      | -  | 0.266        | -           | -                         | 129 |

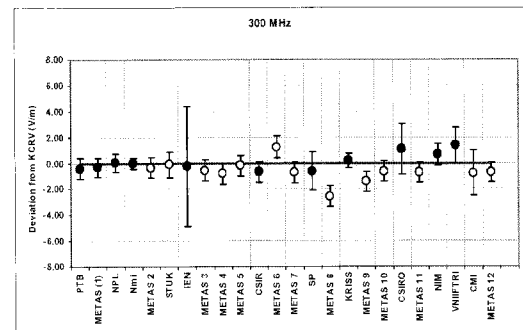
에 대한 각 참여기관의 측정 결과(측정값 및 측정불확도)를 보여준다. 여기서 ●는 KCRV 계산에 사용



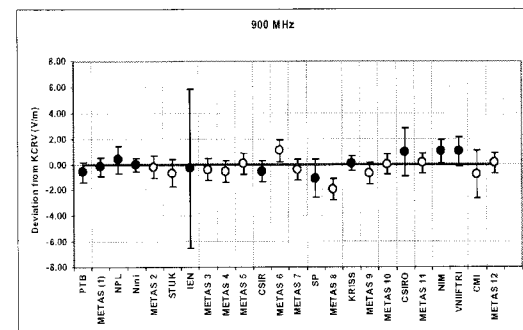
(a) 30 MHz



(b) 100 MHz



(c) 300 MHz



(d) 900 MHz

그림 3. CCEM.RF-K20의 측정 결과

Fig. 3. Measurement results of the CCEM.RF-K20.

된 측정값을 의미하고, ○는 이동표준기의 특성 변화 점검을 위한 측정값 및 CCEM 비회원기관(STUK, CMI)의 측정값으로 KCRV 계산에 사용되지 않은 측정값을 의미하며, error bar는 측정값에 대응되는 측정불확도를 의미한다. 그림 3으로부터 KRISS의 결과가 다른 참여기관의 것에 비해 KCRV와 비교적 잘 일치하고 불확도가 작은 것을 확인할 수 있어, micro-TEM cell을 사용한 표준 전자기장의 발생 시스템의 성능이 우수함을 확인할 수 있다.

#### IV. 결 론

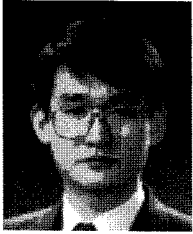
본 논문에서는 micro-TEM cell을 사용한 표준 전자기장 발생법을 기술하고 측정불확도를 평가하였다. 구축된 표준 전자기장 발생 시스템은 auto-leveling 기능을 가진 신호발생부, 최대 1.2 GHz까지 동작하는 micro-TEM cell, 서미스터 마운트를 사용한 전력측정부로 구성된다. 표준 전자기장 발생법의 타당성을 보이기 위해 10 MHz~1 GHz 대역에서 전자기장의 세기 20 V/m 에 대해 실시된 전자기장의 세기 국제 비교(CCEM.RF-K20)의 참여 결과를 제시하였다. 구축된 micro-TEM cell 사용한 표준 전자기장 발생 시스템으로 20 V/m 세기의 전자기장의 발생시킬 때 최대 측정불확도가 0.293 (1.47 %)이었으며, 다른 기관의 결과에 비해 KCRV와 비교적 잘 일치하고 불확도가 작은 것을 확인할 수 있어 구축된 표준 전자기장의 발생 시스템의 우수성을 확인할 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

- [1] IEC 61000-4-3:2006, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-3: Testing and measurement techniques - Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test.
- [2] M. Kanda, R. D. Orr, "Generation of Standard Electromagnetic Fields in a TEM cell", *Nat. Bur. Stand. Tech Note 1319*, Aug. 1988.
- [3] K. Munter, R. Pape, and J. Glimm, "Portable E-field strength meter and its traceable calibration up to 1 GHz using a " $\mu$ TEM" cell", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 46, no. 2, pp. 549-550, Apr. 1997.
- [4] No-Weon Kang, Jin-Seob Kang, Dae-Chan Kim, and Jeong-Hwan Kim, "Fabrication of small reference probe and its application", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 56, no. 2, pp. 435-438, Apr. 2007.
- [5] No-Weon Kang, Jin-Seob Kang, Dae-Chan Kim, Jeong-Hwan Kim, and Joo-Gwang Lee, "Characterization method of electric field probe by using transfer standard in GTEM cell", *to be published in IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Apr. 2009.
- [6] D. Pozar, *Microwave Engineering*, Addison-Wesley Publishing Company, 1990.
- [7] Fundamentals of RF and Microwave Power Measurements (Part 2), *Agilent Application Note 1449-2*, Jul. 2006.
- [8] 강진섭, 김정환, "Air line 임피던스 표준을 이용한 동축형 부하의 임피던스 정밀측정", *한국전자과학기술논문지*, 11(5), pp. 788-795, 2000년 8월.
- [9] 강진섭, 김정환, "두꺼운 외부 도체를 가진 손실이 있는 동축선로의 특성임피던스 근사", *한국전자과학기술논문지*, 11(4), pp. 649-656, 2000년 6월.
- [10] KRISS-99-070-SP, 측정불확도 표현지침, 한국표준과학연구원, 1999년 4월 수정판.
- [11] M. Kanda, D. Camell, Jan P. M. de Vreede, J. Achkar, M. Alexander, M. Borsero, H. Yajima, N. S. Chung, and H. Trzaska, "International comparison GT/RF 86-1 electric field strengths: 27 MHz to 10 GHz", *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.*, vol. 42, no. 2, pp. 190-205, May 2000.
- [12] Final Report on GT-RF Key comparison CCEM. RF-K20: "Comparison of Electrical Field Strength Measurements", Aug. 2005.



강 진 섭



1987년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)  
1989년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)  
1994년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)  
1994년 3월~1995년 3월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 위촉연구원

1995년 3월~1996년 2월: University of Illinois at Urbana-Champaign, Dept. of Electrical and Computer Eng., Postdoctoral Research Associate

1996년 3월~1998년 2월: 충북대학교 전기전자공학부 초빙조교수

1998년 3월~현재: 한국표준과학연구원 전자파센터 책임연구원

[주 관심분야] 전자파 산란 및 역산란, 수치해석, 안테나해석, 전자파 측정 등

강 노 원



1991년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)

1994년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)

2004년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)

1994년 3월~1999년 2월: LG산전

(주) 연구소

2004년 3월~현재: 한국표준과학연구원 전자파센터 선임연구원

[주 관심분야] 전자파 측정 표준(안테나, 전자기장의 세기), 초고주파 측정시스템

김 정 환



1978년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)

1980년 8월: 한국과학원 전기 및 전자공학과 (공학석사)

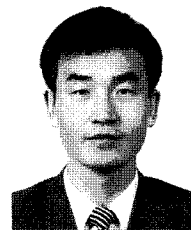
2000년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)

1981년 10월~현재: 한국표준과학

연구원 전자파센터 책임연구원

[주 관심분야] 전자파측정표준(RF 전압, 전력, 안테나, 물질상수 등)

강 태 원



1988년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)

1990년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)

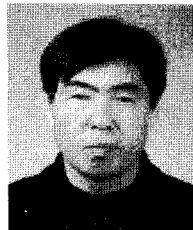
2001년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)

1990년 2월~현재: 한국표준과학연

구원 전자파센터 책임연구원, 센터장

[주 관심분야] 전자파 측정표준(잡음, 전력, SAR 측정프로브 교정), EMC 측정표준

강 응 택



1989년 2월: 대전산업대학 전자공학과 (공학사)

1978년 10월~현재: 한국표준과학연구원 전자파센터 책임연구원

[주 관심분야] 전자파 측정