

3.5 mm 동축형 미소열량계 개발과 전자파전력 측정표준 확립

Development of a 3.5 mm Coaxial Microcalorimeter for Microwave Power Standards

권재용 · 김정환 · 강태원

Jae-Yong Kwon · Jeong-Hwan Kim · Tae-Weon Kang

요약

전자파전력은 전자파 측정표준 분야의 기본 측정량이며, 관련된 주요 전자파 측정량, 예를 들면 감쇠량, RF 전압, 안테나 특성, 전자기장의 세기 등의 국가 표준을 확립하는데 직접 사용된다. 본 논문에서는 전자파전력 측정에 필요한 전자파전력계와 전력 감지기의 측정 원리를 다룬다. 50 MHz~26.5 GHz의 주파수 범위에서 동작하는 전자파전력 국가 표준 원기인 3.5 mm 동축형 미소열량계의 설계, 제작에 있어서의 핵심 사항에 대해서 다루고, 미소열량계를 중심으로 구성된 전력 측정 시스템의 구조 및 동작 원리를 고찰한다.

Abstract

RF and microwave power is a basic quantity in electromagnetic metrology which linked directly to major electromagnetic quantities such as attenuation, RF voltage, antenna characteristics and field strength. This paper deals with a power meter and power sensor with associated theory for RF and microwave power measurement. We study the theory and the key aspects in design of a 3.5 mm coaxial microcalorimeter which works from 50 MHz to 26.5 GHz as a primary microwave power standard.

Key words : Microcalorimeter, Power Standards, Adiabatic Line

I. 서론

전자파전력(power)은 그림 1의 전자파 측정량 상호관계에 나타난 것과 같이 임피던스, 주파수, dc 저항, dc 전압을 바탕으로 전자기장의 세기, 감쇠량, RF 전압 등의 대부분의 전자파 측정량에 직간접적으로 영향을 주는 기본 측정량이다^[1].

산업 현장 및 학계에서 전자파전력의 측정은 RF, 초고주파 부품 및 시스템의 설계와 평가의 핵심적인 기준으로 해당 부품과 시스템의 명세(specification)를 제시하는 중요한 요소이다. 전자파전력을 정확하게 측정하는 것, 달리 말하면 낮은 불확도(uncertainty)로 전력을 측정하는 것은 과학적으로도 중요하지만 경

제적 효율성과도 밀접하게 관련되어 있다. 일반적으로 RF, 초고주파 부품 및 시스템의 가격은 제품 설계의 복잡성 증가, 생산 기술 및 평가의 난이도 증가 등으로 제품의 정격 출력 전력에 비례하거나 고전력 출력 기기의 경우 그 가격은 급격하게 증가한다. 코드 분할 다중 접속(Code Division Multiple Access: CDMA) 방식과 같은 다중 채널 통신에서는 정밀한 측정에 의한 전자파전력의 최적 제어로 통신 용량을 증대시킬 수 있어 통신 산업의 경쟁력과 수익성을 높일 수 있다.

통신 및 방송 시스템은 항상 중요 출력단의 전자파전력이 모니터링 되어 유지 및 관리되므로 전자파전력의 측정 수요는 매우 폭넓고 다양한 형태로

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

· 논문 번호 : 20090730-11S

· 수정완료일자 : 2009년 9월 18일

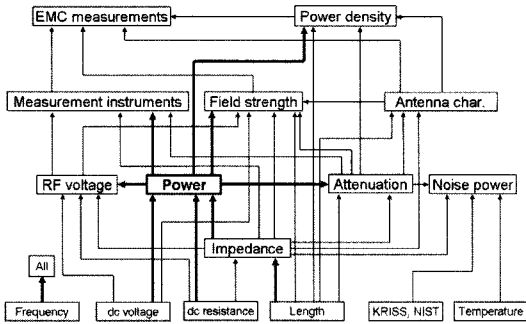


그림 1. 전자파 분야의 주요 측정량 간의 관계
Fig. 1. Relation of electromagnetic measurement quantities.

산업계에서 상존한다. 이에 산업화가 고도화된 국가 일수록 전자파전력에 대한 측정 수요가 다양하고 많아 미국, 독일, 일본과 같은 나라의 계측기 업계에서는 전자파전력을 측정할 수 있는 전자파전력계(power meter) 및 전력 감지기(power sensor) 등을 생산하여 세계 각국에 판매하고 있다. 환경 및 에너지 측면에서도 전자파전력의 정확한 측정은 매우 중요하다. 통신 위성에 의한 인접 국가의 방송 전파 월경(spillover) 및 무선 통신 기지국에 의한 전파 간섭 등은 무선주파수 자원의 활용 증가와 함께 개인 간은 물론 통신 주권 문제로 국가 간의 분쟁이 야기될 수 있다. 또한, 이는 불필요한 전자파 에너지에 인체가 노출되는 일종의 전파 환경 오염으로 볼 수도 있다.

정보 통신 기술의 발전에 따라 더 높은 주파수에서 전자파전력 측정의 필요성이 높아져서 기존의 주파수 범위를 넘어서는 전자파전력에 대한 측정 수요가 꾸준히 증가하고 있다. 이에 따라 미국 NIST(National Institute of Science and Technology), 영국 NPL(National Physical Laboratory), 독일 PTB(Physikalisch-Technische Bundesanstalt) 등 주요국 측정표준 대표기관(NMI: National Metrology Institute)은 자국의 전자파전력 측정 기술의 근간을 제공하기 위하여 그림 2와 같이 동축형의 경우 50 GHz까지, 도파관형의 경우 110 GHz까지 전자파전력 측정표준 원기인 미소열량계를 보유하여 측정 서비스를 제공하고 있다^[2].

이에 한국표준과학연구원(Korea Research Institute of Standards and Science: KRISS)은 두 차례의 한독 기술협력사업으로 구축된 7 mm 및 type-N의 동축형,

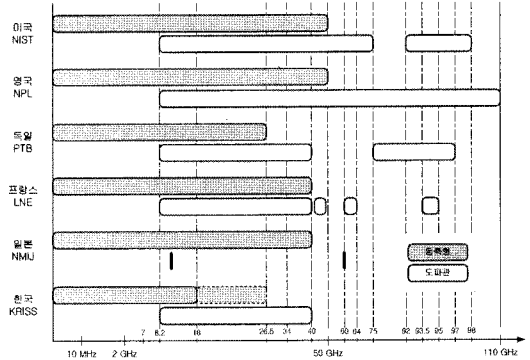


그림 2. 주요 NMI 전자파전력 원기 보유 현황
Fig. 2. Status of RF and microwave power standards of developed countries.

X-, Ku-, K-, Ka-band의 도파관형 미소열량계를 보유하고 있으며, 이를 바탕으로 교정·시험기관 및 산업체를 대상으로 동축형은 26.5 GHz까지, 도파관형은 40 GHz까지 전자파전력 교정서비스를 제공하고 있다^[3].

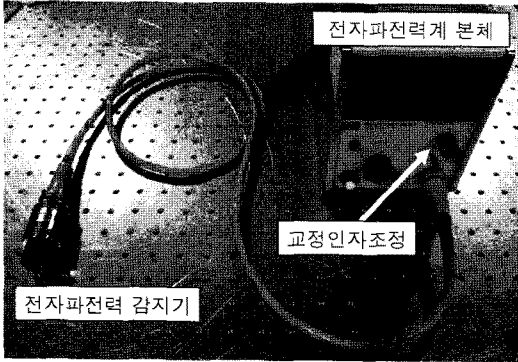
2장에서는 전자파전력 측정의 기본 원리와 개념에 대하여 알아보고, 3장에서는 KRISS에서 개발 중인 3.5 mm 동축형 미소열량계를 살펴봄, 마지막으로 4장에서 결론을 맺는다.

II. 전자파전력의 측정의 기본 원리

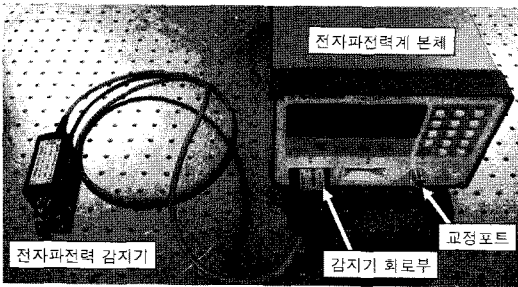
2.1 전자파전력의 정의 및 계측기

1930년대 전자파 발전기가 만들어진 이래 피측정량으로서의 전자파 신호는 1990년대까지 비교적 단순한 형태였다. 최근 통신과 방송 기술의 발달로 시간 영역에서 본 전자파 신호의 형상은 복잡하고, 시변 펄스 신호가 통신 방식에 따라 다양하게 결합되어 전력을 단순한 방법으로 정의하기가 어려워졌으나, 일반적으로 첨두 전력(peak power), 평균 전력(average power), 첨두/평균 전력비(peak to average ratio) 등으로 전자파전력 특성을 규정한다^[4].

그림 3은 전형적인 전자파전력계와 감지기(power meter & power sensor)로 구성된 계측기를 보인다. 보통 감지기의 종류에 따라 측정 주파수 범위와 전력 범위가 결정되며, 감지기의 동작 원리에 따라 다음과 같이 크게 3가지 범주로 나누어진다.



(a) 서미스터 감지기형
(a) Thermistor sensor type



(b) 열전대 감지기형, 다이오드 감지기형
(b) Thermocouple sensor or diode sensor type

그림 3. 전자파전력 계측기

Fig. 3. Photographs of a typical power meter and sensor.

2-1-1 서미스터 감지기(Thermistor Sensor)

볼로미터(bolometer)는 온도에 따라 전기적 특성인 저항이 변화하는 특성을 가진다. 볼로미터에는 두 종류가 있는데, 온도가 높아짐에 따라 저항이 증가하는 소자인 바레터(barretter)와 온도에 높아짐에 따라 저항이 감소하는 소자인 서미스터(thermistor)가 그것이다. 특히 서미스터가 장착된 서미스터 마운트의 경우 dc 대체 전력(dc substituted power)이 출력되며 현재까지 널리 사용되고 있다. 일반적으로 서미스터 마운트는 전력 감지를 위한 서미스터와 측정의 불확도를 줄이기 위하여 장착된 온도 보상용 서미스터로 구성되어 있다. 브리지 회로(Wheatstone bridge circuit)의 일부분으로 구성된 서미스터에는 일정량의 dc 전력이 인가되어 평형상태를 유지하고 있고, 이에 미지의 전자파전력이 서미스터에 입사되어 브리지 회로의 균형을 깨트린다. 전력 감지기의 브리지 회로는 다시 입사된 전자파전력에 상응하는 dc

전력을 감소시켜 다시 균형을 이루게 되고, 감소된 dc 대체 전력으로부터 입사된 전자파전력의 크기를 알 수 있다.

2-1-2 열전대 감지기(Thermocouple Sensor)

열전대 감지기는 서미스터 감지기에 비하여 전자파전력에 대한 감도가 상대적으로 높고 입력 전자파전력에 비례하는 dc 전압을 출력하는 특성을 가져 널리 사용되고 있다. 이중 금속의 접합부에 발생한 열에너지가 전자의 이동에 의하여 출력단에 기전력을 발생하는 열전대 감지기는 열적 특성에 기반을 두므로 평균 전력 측정에 유용하여 연속 전자파(Continuous Wave: CW)에서부터 복잡한 변조가 걸린 신호까지 측정이 가능하며 반도체 공정으로 대량 생산이 가능하다.

사파이어 기판(sapphire substrate)에 열전대를 구성하고 50 Ω의 전송선을 동일 기판 위에 생성하므로 구조적으로 반사를 줄일 수 있어 서미스터 감지기에 비하여 넓은 주파수 대역에서 우수한 반사 계수 특성을 나타낸다. 이와 함께 외부 온도에 대하여도 서미스터에 비하여 둔감하여 비교적 안정적인 온도 특성을 보인다.

2-1-3 다이오드 감지기(Diode Sensor)

다이오드 소자는 동작 주파수의 한계로 전자파 전력 측정에 제한적으로 사용되었으나, 최근의 반도체 기술 발달로 인해 고주파 특성이 우수한 다이오드 감지기가 생산되고 있다. 다이오드의 전압-전류 특성은 원점에 가까운 영역에서 전자파전력 측정이 용이한 square-law 특성을 보인다. 입력 전압이 점점 높아질수록 다이오드 방정식의 고주파 항에 의해 square-law 특성이 더 이상 적용되지 않는 영역이 생기고, 이를 transition region이라 하며, 입력 전압이 더 높아지면 입력 전압과 출력 전압이 비례하는 선형 감지 영역으로 들어가게 된다. 이에 여러 개의 다이오드를 집적하여 특성이 우수하도록 개선한 다이오드 감지기가 개발되었다. 다이오드 감지기는 소자의 특성상 주로 연속 전자파의 평균 전력 측정에 주로 사용된다. 다이오드 감지기는 최저 -70 dBm까지 감지할 수 있어 열 반응에 기반을 두는 서미스터 감지기에 비하여 감도가 아주 높으며 반응 속도도 또

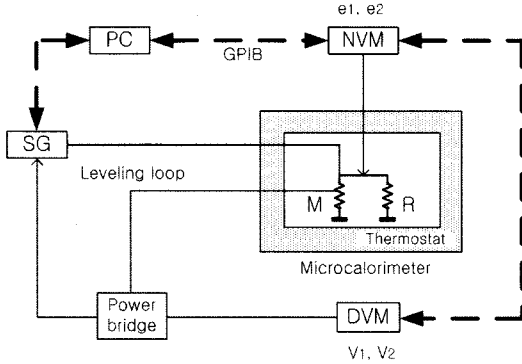


그림 4. 전자파전력 측정 시스템 구성
Fig. 4. A block diagram of a power measurement system.

한 우수하여 100 GHz 대역까지 측정 가능한 다이오드 감지기가 개발되고 있으며, 장기적으로는 열전대와 다이오드를 이용한 전자파전력 감지기가 서미스터 감지기를 대체할 것으로 예상된다.

2-2 전자파전력의 실효효율

그림 4는 한국표준과학연구원에서 보유중인 서미스터 감지기를 전달표준기로 사용하는 미소열량계를 기반으로 하는 전자파전력 측정 시스템의 간략한 구성도로 장비의 구성과 장비 간의 연결을 보여준다. 시스템의 개략적인 동작은 미소열량계의 측정 채널(M)에 피드백이 걸린 신호 발생기에 의하여 일정한 전자파전력 레벨이 유지된다. 이때 전자파전력이 가해지지 않은 기준 채널(R)과 측정 채널(M) 사이에는 온도 차이가 발생되고 그 온도 차이를 열전대열(thermopile)에 의해 기전력으로 측정하게 된다. 이 기전력은 나노 볼트미터(NVM: Nano Volt Meter)로 측정되며, GPIB를 통해 컴퓨터로 제어 및 데이터 수집이 이루어진다.

그림 4의 DVM(Digital Volt Meter)에서 측정되는 전압의 전자파 인가 전의 값을 V_1 , 전자파 인가 후의 값을 V_2 라 하고 NVM에 의해 열전대열에서 측정되는 기전력의 전자파 인가 전 값을 e_1 , 전자파 인가 후의 값을 e_2 라 하자.

M 채널에 전자파전력이 인가되지 않은 상태에서 V_1 은 브리지 회로의 균형 상태를 유지하며 일정한 값을 나타내고, e_1 역시 일정한 값을 유지할 것이다. 전자파전력이 인가되면 브리지 회로의 전압은

V_2 가 된다. 이 때 M 채널은 전자파전력이 인가되어 R 채널에 비하여 온도가 상승하게 되고 열전대열에서 기전력이 발생한다. 전자파전력 인가 후 35~40분 정도 경과하고 나면 기전력은 정상 상태에 이르고 이를 e_2 라고 한다.

브리지 회로의 저항을 R_0 라 하면 전자파의 입사로 발생한 dc 대체 전력(P_s)는 다음과 같다.

$$P_s = \frac{1}{4R_0} (V_1^2 - V_2^2) \quad (1)$$

전자파전력이 가해질 때에 서미스터 감지기에서의 총전력(dc+RF)은 열전대열 기전력 e_2 에 비례하여 그 비례상수는 $V_1^2/4R_0e_1$ 이 된다. 따라서 전자파전력 P_n 은 총전력과 dc 대체 전력의 차이로서 다음과 같이 표현된다.

$$P_n = \frac{1}{4R_0} \left(\frac{e_2}{e_1} V_1^2 - V_2^2 \right) \quad (2)$$

서미스터 감지기에 들어온 순 전력과 이때의 dc 대체 전력의 비를 실효효율(η_e)이라 하고, 식 (1)과 (2)로부터 다음과 같이 정의한다^[3].

$$\eta_e = \frac{P_s}{P_n} = \frac{1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2}{\frac{e_2}{e_1} - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2} \quad (3)$$

2-1절에서 소개된 감지기들은 주파수가 올라감에 따라 전송선의 손실이 커지고 정재파에 의한 열에너지 분포도 달라지므로 주파수에 따른 보정인자를 고려하여야 하므로 그림 3(a)와 같이 전력계에는 직접 조정할 수 있는 교정인자 조정단자가 붙어 있거나, 그림 3(b)의 감지기 회로부의 메모리에 교정인자가 저장되어 자동으로 조정된다.

열전대 및 다이오드 감지기를 전달 표준기로 사용하는 미소열량계 시스템은 서미스터 감지기를 이용하는 미소열량계 시스템과 근본적으로 다른 구조를 가진다. 열전대 감지기는 브리지 회로를 구성할 수 없으므로 dc 전력 대체법을 직접 적용할 수 없기에 상응하는 LF(Low Frequency) 신호를 기준으로 삼는다. 즉, 동일한 채널에 기준이 되는 LF 신호를 입사하고 다음으로 RF 신호를 입력하여 시스템의 응답비를 이용하여 교정인자를 정의하여 열전대 감지

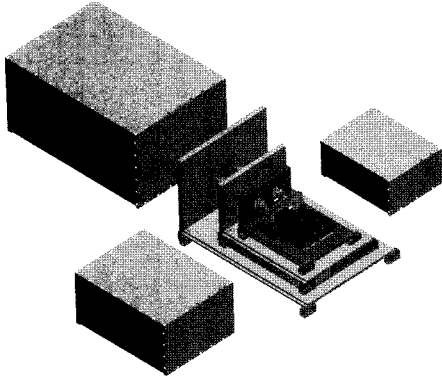


그림 5. 3.5 mm 동축형 미소열량계
Fig. 5. 3.5 mm coaxial microcalorimeter.

기를 평가하게 된다^[5].

Ⅲ. 3.5 mm 동축형 미소열량계 개발

3-1 미소열량계 개발의 주요기술

3-1-1 열 차단 동축선로와 열전대열

그림 5는 한국표준과학연구원에서 독자적으로 개발 중인 3.5 mm 동축형 미소열량계로 26.5 GHz까지 전자파전력의 측정이 가능한 전자파전력 국가표준 원기이다. 미소열량계는 입사되는 mW 단위의 전자파전력이 발생시키는 열에너지를 감지하여 측정하므로 전자파는 잘 전달하면서 주변 환경 및 모델링이 어려운 전송선 채널 부분에서 발생한 열이 열전대열(thermopile)과 격리될 수 있도록 열 차단 선로(adiabatic line)를 설계하는 것이 중요하다. 그림 6은 유한요소법(finite element method)을 기반으로 하는 열전달 시뮬레이션을 수행하여 최적화된 열 차단 선로의 일부분으로 튜브형의 동축선 내부 도체, 도금된 합성수지로 만들어진 동축선 외부 도체 등이 적용되었다. 그림 6의 A 지점에 전자파전력이 열에너지로 바뀌는 50 Ω load가 장착되므로 A 지점을 열원(heat source)으로 가정하고 B 지점에서의 열전달을 시뮬레이션하는데 등온선의 밀집 정도에 따라 열 차단 구조체에 의한 효과를 예상할 수 있다. 그림 7은 약 265 mm 길이의 두 열 차단 선로에 의한 감쇠량을 측정된 것으로 채널 손실이 2 dB 이하로 측정되었으며, M 채널을 측정 채널로 선정하여 전자파

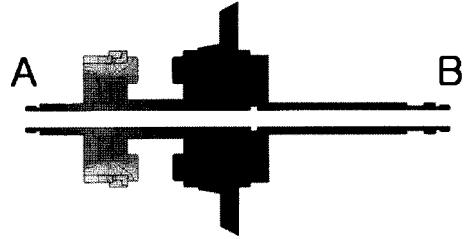


그림 6. 열 차단 동축선의 유한요소 시뮬레이션
Fig. 6. A heat flow simulation result of an adiabatic line.

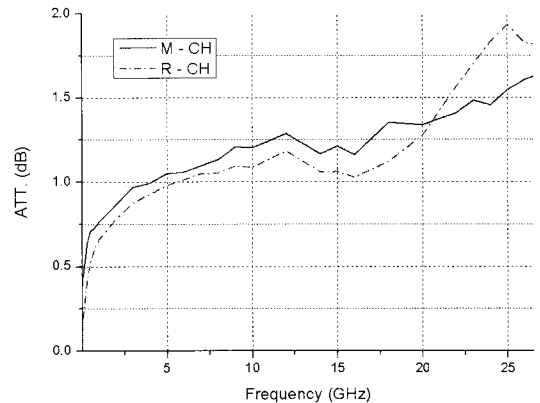


그림 7. 열 차단 동축선의 전자파전력 감쇠량
Fig. 7. The power attenuation of adiabatic lines.

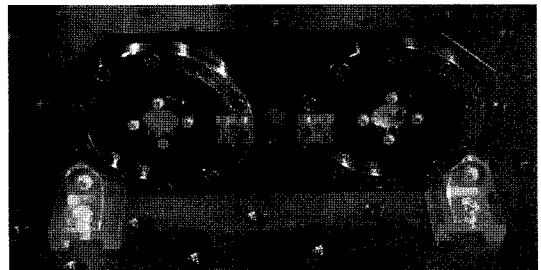


그림 8. 열전대열과 프로브
Fig. 8. Thermopile and its probe.

전력을 인가한다.

그림 8은 미소열량계의 측정 채널과 기준 채널 간의 온도차를 기전력으로 나타내는 열전대열과 프로브(probe)로 4층 구조의 박막으로 97쌍의 Cu-Constantan 열전대(thermocouple)이다. 일반적으로 열전대의 집적도가 높을수록 온도차에 의한 기전력의 크기는 증가하지만 열전대열의 저항도 함께 증가하므로 적절한 집적도를 선택하는 것도 매우 중요하다.



그림 9. KRISS 전자파전력 전달표준기의 단면도
Fig. 9. The cutaway view of the KRISS power transfer standard.

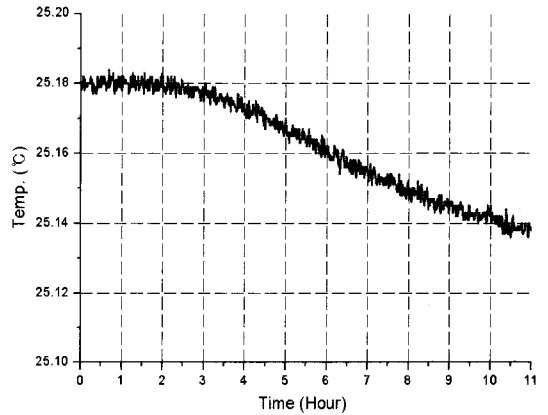
3-1-2 항온조(Thermostat) 및 전달표준기

미소열량계는 전자파전력으로부터 발생한 작은 열에너지의 변화를 측정하므로 감지기 및 열전대열 등의 핵심 부품을 항온상태로 유지하는 것이 매우 중요하다. 이에 KRISS에서는 능동형 항온조를 적용하여 외부에서 유입되는 열에너지를 차단하였다. PID (Proportional-Integral-Derivative) 제어가 적용된 2단의 능동형 알루미늄 실드(shield)와 1단의 수동형 구리 실드를 장착한 능동형 건식 항온조(dry-type active thermostat)를 적용하여 수냉식 항온 시스템에 비하여 부피를 대폭 줄이면서도 시간당 온도 변화가 수 mK에 근접하도록 설계되었다.

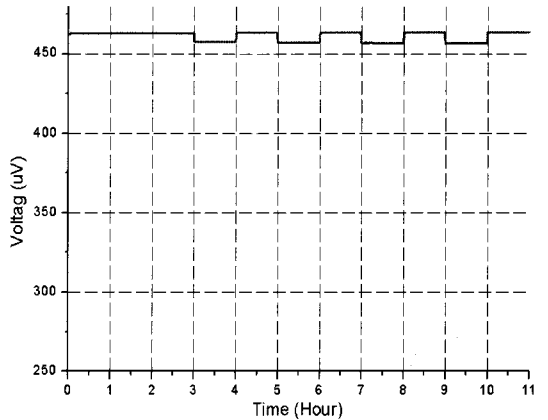
전달 표준기(transfer standard)는 미소열량계에서 특성이 평가되어지는 표준기로 이를 전자파전력 측정 시스템의 2차 표준기로 삼아 주로 산업체에서 의뢰하는 전력 감지기를 교정하게 된다. 그러므로 전달 표준기의 정확한 특성 평가와 함께 안정된 특성의 전달 표준기를 만드는 것도 대단히 중요하다. 그림 9는 3.5 mm 동축형 열전대 전력 감지기를 변형하여 만든 전달 표준기의 단면도로 열적 안정도를 고려하여 설계되었으며, 미소열량계의 열전대열과 열접촉이 잘 유지되도록 정밀하게 제작하였다.

3-1-3 전자파전력 측정 시스템 제어

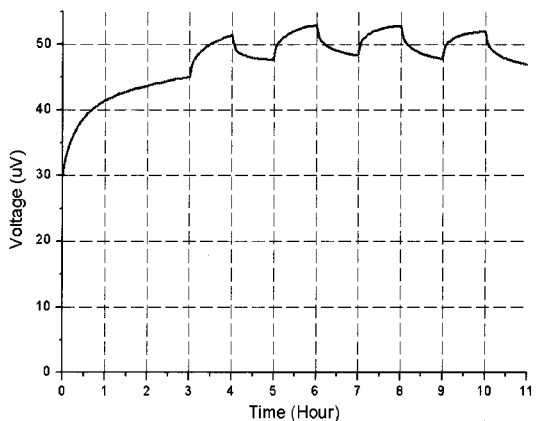
전자파전력에 의한 미소열량계의 온도 변화는 일반적으로 지수함수 형태로 변화하므로 측정에 필요한 시간이 매우 길어 측정 주파수가 많을 경우 일주일 이상 측정이 계속될 수도 있다. 이에 장시간의 안정적인 전자파전력 측정 시스템의 제어와 모니터링은 매우 중요하다. 긴 시간 동안의 측정 정밀도를 높이기 위하여 미소열량계에 인가되는 RF 신호원은 레벨링 루프(leveling loop)를 사용하여 안정화하



(a) 온도 변화
(a) Temperature



(b) 전달표준기 출력 전압
(b) Output voltage of the transfer standard



(c) 열전대열 출력 전압
(c) Output voltage of the thermopile

그림 10. 전자파전력 측정 시스템의 측정 결과
Fig. 10. The measured results of the microcalorimeter system.

였으며, LF 신호원은 신호의 크기 조절이 쉽고 정확도가 높은 calibrator 급의 장비를 사용하였다. 열전대열과 전달 표준기에서 나오는 기전력의 크기는 입력 신호의 주파수와 크기에 따라 수백에서 수십 μV 이므로 정밀 측정이 가능한 NVM으로 측정하였으며, 온도 안정화를 위하여 항온실에서 원격 제어 및 모니터링으로 측정을 수행하였다.

3-1-4 측정 결과

그림 10은 20 GHz의 전자파전력 입사에 따른 전달 표준기와 열전대열의 출력 전압과 이때의 시스템 온도 변화를 보인다. 그림 10(a)를 보면 시간당 온도 변화율은 약 4 mK 이하를 나타내고 있다.

그림 10(b)에서 볼 수 있듯이 미소열량계에는 3 시간 동안 1 kHz의 LF가 입력된 후에 약 2 mW의 20 GHz의 RF와 1 kHz의 LF가 한 시간 간격으로 4회 입사되었으며, 이때 전달 표준기의 출력 전압은 약 463 μV 로 전달 표준기에 도달하는 두 입력간의 전자파전력 차가 1 pW 이내로 우수한 특성을 가진다. 그림 10(c)는 열전대열에서 발생한 기전력을 보이는데 LF 신호에 의한 안정화 과정을 거쳐 RF와 LF의 입사 전자파전력의 변화에 따라 지수 함수 형태로 상승과 하강을 반복하고 있다. RF 입력에 대한 출력 전압(e_1)과 LF 입력에 대한 출력 전압(e_2)의 비를 식 (4)와 같이 열전대 감지기에서의 실효효율로 정의하고 이때 g 는 전달 표준기(미소열량계)의 특성 상수이고 실효효율은 0.96로 계산된다^[6].

$$\eta_e = g \frac{e_2}{e_1} \quad (4)$$

IV. 결 론

본 논문에서는 전자파전력 국가 표준 원기로 사용

되는 미소열량계 측정 시스템의 동작 원리 및 주요 핵심 기술에 대하여 알아보았으며, 국내 최초로 개발된 3.5 mm 동축형 미소열량계 전자파전력 측정 시스템의 20 GHz에서의 측정 결과를 보였다.

본 연구에서 개발된 열 차단 선로 설계 기술 및 항온 제어 기술, 측정 시스템 제어 기술 등은 향후 2.4 mm 동축형 및 40 GHz 이상의 도파관형 미소열량계의 설계와 운용에 적용되어 전자파전력 국가 표준 확립에 크게 기여할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] A. Fantom, *Radiofrequency & Microwave Power Measurement*, Peter Peregrinus Ltd., England, 1990.
- [2] M. Kinoshita, "Survey of microwave power standard", *AIST Bulletin of Metrology*, vol. 4, no. 3, 2006.
- [3] T. W. Kang, N. S. Chung, R. Honigbaum, J. Ruhaak, and U. Stumper, "K- and Ka-band waveguide microcalorimeters for microwave power standards", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 46, no. 6, pp. 1247-1250, Dec. 1997.
- [4] Agilent Technologies, *Fundamentals of RF and Microwave Power Measurements(Part 1, 2, 3, 4)*, Application Note 1449, 2003.
- [5] D. Janik *et al.*, "CCEM key comparison CCEM. RF-K10.CL(GT/RF 99-2) power in 50 ohm coaxial lines, frequency: 50 MHz to 26 GHz", in *Proc. 27th CPEM*, London, U.K., pp. 246-247, Jun. 2004.
- [6] L. Brunetti, L. Oberto, M. Sellone, and E. T. Vremera, "Comparison among coaxial microcalorimeter models", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, no. 4, pp. 1141-1145, Apr. 2009.

권재용

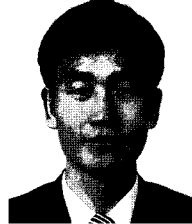


1995년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1998년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
2002년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
2002년 2월~2005년 3월: LG전자기술원 소자재료연구소 선임연구원

2005년 4월~현재: 한국표준과학연구원 전자파센터 선임연구원

[주 관심분야] 전자파 측정표준(전력, 임피던스 등)

강태원



1988년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1990년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
2001년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
1990년 2월~현재: 한국표준과학연구원 전자파센터 책임연구원 센터장

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

김정환



1978년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1980년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
2000년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
1981년 10월~현재: 한국표준과학연구원 전자파센터 책임연구원

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