

8.2 GHz - 18 GHz 주파수범위에서의 전력표준 (Power Standards in the Frequency Range of 8.2 GHz to 18 GHz)

姜泰遠*, 鄭樂三*

(Tae Weon Kang and Nak Sam Chung)

要約

도파관형 미소열량계를 이용하여 X-band 및 Ku-band의 주파수대역에서 전자파전력의 국가표준을 확립하여 관련산업체에 보급함으로써 산업발전에 기여해 왔다. 이를 위한 표준 도파관형 써미스터마운트들의 최근 수년간의 실효효율 측정값들을 비교, 분석함으로써 표준유지의 정확도를 확인하였다.

Abstract

The national standards of microwave power in X-band and Ku-band were established using the waveguide microcalorimeters and have been disseminated to the related industries to contribute to industrial development. Through the comparisons and analysis of the measured effective efficiencies for waveguide thermistor mounts in the recent years, the accuracy for maintenance of power standards was confirmed.

I. 서론

DC나 가청주파수대역에서 전력을 측정하기 위해서는 회로 내의 임의의 지점에서 전압이나 전류를 정확히 측정하면 된다. 반면에 RF 또는 마이크로파대역에서는 전기신호의 파장이 측정장비의 크기와 비슷하거나 더 짧아져서 회로소자들을 상호연결시켜주는 전송선로의 각 지점에서 전압과 전류의 크기와 위상이 달라지게 된다. 따라서 1 GHz 이상의 마이크로파 주파수대역에서는 전압이나 전류의 측정은 아주 어려울 뿐만 아니라 별 의미를 갖지 않으며 실제로 의미가 있고 측정가능한 양은 전송선로 상의 위치에 따라서 그 크기가 변하지 않는 전력(power)이다.

1955년 미국표준국(National Bureau of Standards)의 Macpherson과 Kerns는 열량계방법으로 볼로미터마운트의 효율 및 대체오차의 측정법을 제안하였다.^[1] 1959년 같은 기관의 Engen은 실험실 내부의 온도조절, DC전압측정정확도의 개선, 실험의 반복도향상을 위한 기계적인 구조의 개량등을 통하여 측정의 정확도를 높였다.^[2] 그 후, 선진각국에서는 Engen형 미소열량계를 개량한 다양한 형태의 미소열량계를 제작하여 자체의 전력표준을 확립, 유지해 오고 있다.^[3,4,5,6] 현재 당연구원이 보유하고 있는 동축형 및 도파관형 마이크로파 미소열량계는 한독기술협력사업에 의하여 독일 연방물리기술청(Physikalisch-Technische Bundesanstalt)에서 제작되어 1985년 당연구원에 인도된 장비로 마이크로파 주파수대역의 전력표준확립을 위한 표준원기이다.

본 논문에서는 1985년에 확립되고 유지되어 온 전자파전력 국가표준의 수년 간의 측정결과들을 상호비교하고 표준유지의 정밀정확도에 대하여 살펴 보고자 한다.

*正會員, 韓國標準科學研究院 電子波研究室
(Korea Research Institute of Standards
and Science, Electromagnetics Laboratory)
接受日字: 1992年 9月 8日

II. 이론

1. 전자파전력의 측정

전자파전력은 열량계(calorimeter), 볼로미터마운트(bolometer mount), 열전대감지기(thermocouple sensor), 다이오드감지기(diode sensor)등으로 측정할 수 있으며, 이 중에서 볼로미터마운트가 가장 널리 사용되고 있다. 볼로미터란 온도에 따라 그 저항값이 바뀌는 소자를 말하며, 양의 온도계수를 갖는 바렛터(barretter)와 음의 온도계수를 갖는 써미스터(thermistor)의 두 종류가 있다. 그런데, 우리나라에서는 전력전달표준으로 써미스터마운트를 주로 이용하기 때문에 볼로미터를 써미스터라고 부르기로 한다. 초기에는 써미스터 소자의 저항값의 변화를 측정하여 입사전력을 결정하였으나, 이 방법은 저항값과 전력의 관계가 비선형적인 단점이 있다. 이 문제점을 해결하기 위하여 DC대체법(substitution method)이 고안되었다. DC대체법은 써미스터가 일정한 저항값을 유지하게 하는 DC전력과 입사RF전력이 서로 같다고 보아 DC전력을 측정하여 RF전력을 결정하는 것이다. 그러나, 이 방법은 두 가지의 근본적인 오차요인을 가지고 있다. 그 첫번째 요인은 RF-DC대체오차(substitution error)로서 이는 써미스터소자 내에서의 RF와 DC의 서로 다른 전류분포로 인해 생기는 열적효과의 차이에 기인한다. 두번째 요인은 써미스터마운트 내에 입사한 RF에너지 중 대부분은 써미스터소자에 흡수되어 열로 변환됨으로써 대체전력에 기여하지만 일부는 마운트의 벽면이나 써미스터의 지지대 등에서 손실되므로 대체전력에 기여하지 못하기 때문에 측정에 오차가 생길 수 있다. 이상의 두가지 효과는 분리하여 계산 또는 예측하기가 어려울 뿐만 아니라 구분하여 측정할 필요가 없으므로 하나로 묶어서 실효효율(effective efficiency)이라는 인자를 사용하는데, 실효효율 η_e 는 다음과 같이 정의된다.

$$\eta_e = \frac{\text{DC대체전력}}{\text{써미스터마운트에 입사한 순전력}} = \frac{P_{sub}}{P_{net}} \quad (1)$$

그러므로 써미스터마운트의 실효효율 η_e 를 알면 RF전력 P_{net} 는 DC대체전력 P_{sub} 을 측정함으로써 구할 수 있다. 실효효율은 무차원의 상수이며 퍼센트로 표시되기도 한다.

써미스터마운트의 반사계수가 Γ 일 때 입사전력 P_i 중 일부분이 신호원 쪽으로 반사(P_r)되므로 식 (1)에서 P_{net} 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{net} = P_i - P_r = (1 - |\Gamma|^2) P_i \quad (2)$$

식 (1)과 (2)를 이용하면 입사전력 P_i 는

$$P_i = \frac{P_{sub}}{(1 - |\Gamma|^2) \eta_e} = \frac{P_{sub}}{K_b} \quad (3)$$

로 표현되며, 여기서

$$K_b = (1 - |\Gamma|^2) \eta_e \quad (4)$$

로 정의된다. K_b 는 써미스터마운트의 실효효율과 반사계수의 효과를 결합한 것으로서 교정인자(calibration factor)라 하며 실제로 전자파전력을 측정할 때 많이 사용된다.

2. 마이크로파미소열량계의 동작원리

미소열량계는 써미스터마운트를 열량계 몸체로 사용하여 써미스터마운트에 입사되는 순전력 P_{net} 를 열량계적 방법으로 측정하고, 그와 동시에 DC대체전력 P_{sub} 을 DC대체법으로 측정하여 써미스터마운트의 실효효율을 구하는 원리로 동작한다. 앞에서 언급한 바 있는 바 있는 Engen형 마이크로파 미소열량계는 RF전력의 전달표준으로 상용되는 써미스터마운트를 열량계 몸체로 사용한다. 미소열량계에서 열량계 몸체의 온도상승 측정은 열전대접합 여러개를 직렬로 연결한 형태의 열전대렬(thermopile)을 이용하여 온도차에 의한 기전력을 측정함으로써 이루어진다. 열전대로는 Constantan-NiCr 열전대가 쓰이며, X-band에서는 40쌍, Ku-band에서는 36쌍을 직렬로 연결하여 도파관 플랜지 밀부분에 잘 접촉되게 설치하였다.

미소열량계를 이용한 측정시스템을 그림 1에 보였다. 먼저 실부하(active load)에 DC바이어스만을 가한 상태에서 열전대렬의 기전력이 평형상태에 이르게 한다. 평형상태에 도달하는 데에는 약 1시간이 걸린다. 평형상태에서 실부하와 기준부하(reference load) 사이에 연결된 열전대렬 기전력의 변화가 1시간 동안 $\pm 0.02 \mu V$ 이내로 되면 이상적인 측정상태로 볼 수 있다. 평형상태에서의 열전대렬 출력을 NVM(nanovoltmeter)으로 측정한다. 그 다음에 크기를 알고 있는 RF전력을 실부하에 인가하되, 열전대렬출력이 평형상태에 이르기까지 일정한 크기로 인가되어야 한다. 이를 위하여 NBS Type-II 전력브리지의 PIN출력을 신호발생기의 AM(진폭변조)입력단으로 케환시켰는데 이것이 전력의 자동안정화 제어(automatic leveling control)루프이다. 그림 2

는 주파수 12.4 GHz에서, 10 mW정도의 RF전력을 일부하에 인가하였을 때, 기준부하와 일부하 사이의 온도차이의 변화로 인하여 열전대렬 기전력이 시간에 따라 변하는 모습을 그린 것이다. 그림 2에서 보는 바와 같이 RF전력을 인가한 후 35분이 경과하면 열전대렬기전력이 다시 평형상태에 도달한다. 이 때, 열전대렬기전력 e_2 를 측정한다. 측정이 진행되는 동안 실험실의 온도변화에 의해 열전대렬기전력이 변할 수 있는데, 이는 온도가 단조증가하거나 단조감소한다고 가정하면 측정을 시작할 때의 기전력 e_1 과 측정이 끝날 때의 기전력 e_2 를 측정하여 이들 두 값의 평균을 e_1 으로 택함으로써 주위온도변화에 의한 오차를 보상한다.

한편, NBS Type-II 전력브리지의 DC출력전압 V 는 RF전력이 인가되는 순간에 즉각적으로 변하므로 e_1, e_2 를 측정할 경우에서의와 같이 장시간 기다리지 않아도 된다. 즉, e_2 를 측정할 때 V_2 를 측정하고 RF전력이 OFF된 직후에 DC출력전압 V_1 을 측정하면 된다. 이와 같이 하면 V_1 과 V_2 측정할 때 시간간격이 짧으므로, 주위온도의 변화에 의한 전력브리지의 DC출력전압의 변화는 10^6 V이하가 되어 무시할 정도로 작다.

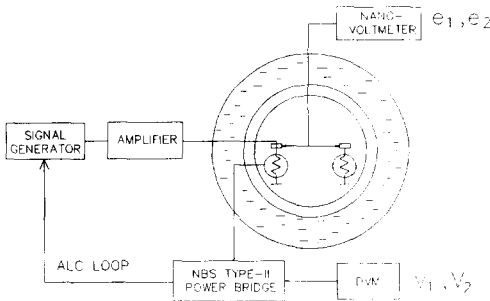


그림 1. 미소열량계 측정시스템
Fig. 1. Microcalorimeter measurement system.

측정된 V_1, V_2 로부터 DC대체전력 P_{sub} 은 다음의 식에 의해 구해진다.

$$P_{sub} = \frac{1}{R_0(1+100/R_0)}(V_1^2 - V_2^2) = \frac{1}{K}(V_1^2 - V_2^2) \quad (5)$$

여기서, R_0 는 평형상태에서 써미스터마운트의 동작 저항이며, HP X486A와 HP P486A 써미스터마운트의 동작저항은 100Ω 이다. 또한 RF전력이 가해질 때 써미스터마운트의 총전력은 열전대렬 기전력 e_2 에 비례하며 그 비례상수는 $V_1^2 (k \cdot e_1)$ 이 된다. 그러므로, RF전력을 가했을 때의 총전력(RF전력+DC바이어스전력)에서 그, 때의 DC전력을 빼면 RF전력이 계산된다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$P_f = \frac{1}{K}(e_2 V_1^2 - V_2^2) \quad (6)$$

식 (5)와 (6)으로부터 실효효율은

$$\eta'_e = \frac{P_{sub}}{P_f} = \frac{1 - (V_2/V_1)^2}{e_2/e_1 - (V_2/V_1)^2} \quad (7)$$

로 구해진다. η'_e 의 '은 보정전의 값임을 의미한다. [7]

3. 실효효율에 대한 보정인자

도파관형 미소열량계의 각종 계통오차들에 대한 분석실험 및 결과는 기발표된 논문 [8]에 자세하게 기술되어 있으므로 여기서는 결과식만을 보인다.

$$\eta_e = a \cdot q \cdot L \cdot \eta'_e \quad (8)$$

$a = 1 + (1 - \eta') \cdot \bar{P}_w$ 써미스터마운트 벽면에서의 RF손실

$q = 1 - \frac{\Delta k}{k_1} \cdot \frac{1}{P(2-p)}$: 열전대렬기전력의 비직선성

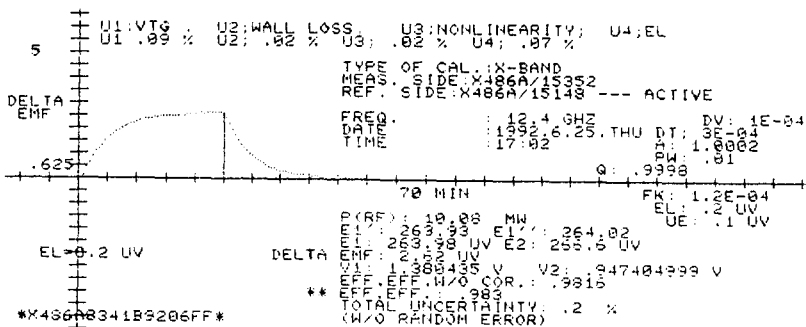


그림 2. 12.4 GHz에서의 측정예
Fig. 2. Measurement example at 12.4 GHz.

$$L = 1 + \frac{e_1 / e_1}{e_2 / e_1 - (V_2 / V_1)^2} \quad : \text{ 열차단부분의 RF손실}$$

$$p = \frac{V_1 - V_2}{V_1}$$

여기서, k_1 은 써미스터마운트에서 열로 변환되는 전체전력과 열전대렬 기전력 사이의 비례상수이고, Δk 는 입력 RF전력과 열전대렬기전력 사이의 비직선성을 나타내는 인자이다. \bar{P}_w 는 RF전력 인가시 써미스터 소자에서의 열상승효과와 도파관 벽면에서의 RF손실로 인한 열상승효과가 다름을 인하여 발생하는 오차이다. 미소열량계에는 외부온도의 변화가 내부로 전달되지 않도록 하기 위한 단열부분이 세 군데에 설치되어 있다. 이들 중에서 측정플랜지면에서 가장 가까운 부분에 설치된 0.02mm두께의 구리박막에 금도금을 한 박막형 열차단부분에서의 RF손실이 e_1 이다.

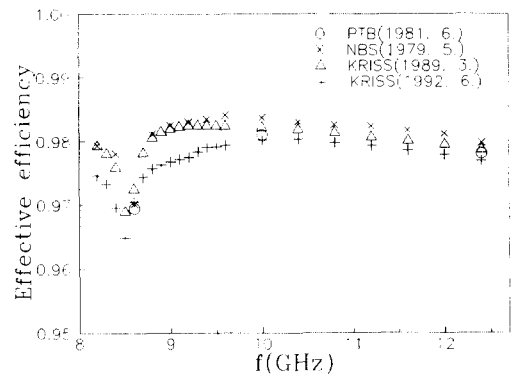
III. 실험결과 및 고찰

써미스터마운트의 실효효율 측정실험은 온도 $23 \pm 1^\circ\text{C}$, 습도 55 %이하로 유지되는 실험실에서 수행되었다. 써미스터마운트에 입사되는 RF전력은 앞에서 논의한 전력안정화루프에 의해 안정화하였다. 그리고, 제어가능한 전력의 범위를 조절하기 위하여 47 k Ω 의 저항을 연결하여 NBS Type-II 전력브리지의 PIN출력을 감시시켰다. 1 회 측정시 소요되는 시간은 70 분이며, 이 중에서 앞의 35 분 동안은 RF전력을 인가하고 뒤의 35 분은 RF전력을 인가하지 않는다. RF전력의 ON/OFF에 따른 열전대렬기전력 변화는 그림 2와 같다.

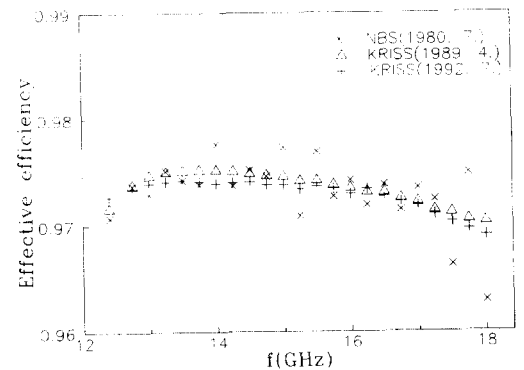
측정된 전압 V_1 , V_2 와 열전대렬기전력 e_1 , e_2 값을 식 (7)에 대입하여 보정을 가하기 전의 실효효율 η' 를 계산한다. 그 후에 식 (8)에 의해 보정된 최종의 실효효율 η_c 를 구한다.

12.4 GHz에서 측정한 결과를 그림 2에 보였다. 여기서 피측정 써미스터마운트의 모델명은 HP X486A이고 기기번호는 15148이다. 측정측(measurement side)과 기준측(reference side)은 두 개의 포트를 구별하기 위한 것으로서, RF전력이 입사되는 쪽이 측정측이 된다. 양 쪽에 동일한 종류의 써미스터마운트가 연결된 상태에서 RF전력이 입사되는 쪽에 연결된 써미스터마운트가 실부하(active load)로서 측정하고자 하는 부하이다. 입사되는 RF전력은 10 mW이고, 측정된 미보정실효효율은 0.9816이다. 그림 2에서 e_1 , e_1' , e_1'' 은 전장에서 설명

한 바와 같다. 보정된 실효효율이 0.9830이다. U_1 은 전압측정오차가 실효효율에 미치는 오차이다. U_2 , U_3 , U_4 는 각각 써미스터마운트 벽면에서의 RF손실, 열전대렬기전력의 비직선성, 열차단부분에서의 RF손실 측정오차가 실효효율에 미치는 오차들로서 $(a-1)$, $(1-Q)$, $(L-1)/2$ 이다. 이들을 모두 합한 값이 계통오차(systematic error) U_s 이며 그림 2의 예에서는 0.2 %이다. 우연오차(random error)는 여러 번 측정했을 때 측정값들 사이의 표준편차로서 0.1 %보다 작다. 총측정오차 U_T 는 계통오차 U_s 와 우연오차 U_R 을 합한 값이다.



(a)



(b)

그림 3. 실효효율의 측정결과

- (a) X-band 도파관형 써미스터마운트
- (b) Ku-band 도파관형 써미스터마운트

Fig. 3. Measured results of effective efficiencies.

- (a) X-band waveguide thermistor mount.
- (b) Ku-band waveguide thermistor mount.

X-band 및 Ku-band에서의 측정결과를 그림 3에 보였다. 먼저 X-band 측정결과를 보자. 피측정 써미스터마운트는 HP X486A(일련번호 15351RS)이고, 그림에 표시한 값은 한 주파수에서 세번 측정한 값의 평균이다. 이전의 측정값보다 크기는 0.5 % 정도 낮아졌음을 알 수 있다. 이것이 써미스터마운트의 노후현상으로부터 기인한 것인지 아니면 미소열량계에 써미스터마운트를 뺐다 붙였다 하는 플랜지면의 상태가 고르지 못한 데서 기인한 것인지는 판별하기가 어렵다. Ku-band에서는 HP486A(일련번호 10568RS)의 실효효율을 측정하였는데 1989년에 측정한 것과 비교하면 0.2 %이내에서 잘 일치한다.

IV. 결 론

마이크로파 주파수대역에서의 전력은 미소열량계방법으로 정확히 측정할 수 있다. 현재 당 연구원은 도파관형 및 동축형 미소열량계를 보유하고 있으며, 도파관형 미소열량계는 X-band 및 Ku-band의 것이 있다. 전자파전력의 국가표준을 확립, 유지하기 위해 써미스터마운트를 이용하는데, 본 논문에서는 전력표준확립 당시부터 지금까지 측정한 표준 도파관형 써미스터마운트들의 실효효율을 상호비교하였다. 그 결과 X-band에서는 0.5 %, Ku-band에서는 0.2 % 이내로 잘 일치하였다. 이 결과들은 마이크로파주파수 대역의 제품을 개발하거나 기초연구를 수행하는 관련산업체와 연구소 등에 정밀정확한 전력표준을 전달하여 산업발전을 도모하는 데에 유용하게 쓰이고 있다.

감사의 글

당연구원의 미소열량계는 한독기술협력사업에 의해 독일의 PTB(Physikalisch- Technische Bundesanstalt)에서 제작되어 우리나라에 인도되었다. 이 사업에 관계된 양국의 모든 분들께 감사드린다. 특히, PTB의 고주파표준연구실의 Dr. Stumper와 기기의 제작에 심혈을 기울여 주신 Honigbaum씨

가 감사드린다.

參 考 文 獻

- [1] A. C. Macpherson and D. M. Kerns, "A Microwave Microcalorimeter," *Rev. Sci. Instr.*, vol. 26, no. 27, 1955.
- [2] Glenn F. Engen, "A Refined X-band Microwave Microcalorimeter," *Journal of Research of the NBS*, vol. 63-C, no. 1, pp. 77-82, July 1959.
- [3] G. Geneves and L. Charles, "Microcalorimetric Power Standards Using Bolometer Mount at High Frequency," *Bulletin du BNM*, no. 82, pp. 17-22, Oct. 1990.
- [4] Fang Yan and Wu Youzhang, "A New Microcalorimeter in Ka Band," *Proc. of MTT symposium*, pp. 396-397, 1990.
- [5] Ladislav Grno, P. Podhoransky, and J. Groch, "Non-Steady-State Microcalorimeter," *IEEE Trans. Inst. and Meas.*, vol. 40, no. 2, pp. 366-367, April 1991.
- [6] Rolf Honigbaum and Ulrich Stumper, "High Frequency Power Standards to 40 GHz," PTB(Physikalisch Technische Bundesanstalt)-E-38, pp. 113-126, July 1990.
- [7] 정낙삼, 김정환, 신준, 홍기민, 국가표준유지향상에 관한 연구 - 전자파전력 국가표준확립, KSRI-86-11-IR, pp. 34, 1985.
- [8] N. S. Chung, J. Shin, H. Bayer, and R. Honigbaum, "Coaxial and Waveguide Microcalorimeters for RF and Microwave Power Standards," *IEEE Trans. Inst. and Meas.*, vol. 38, no. 2, pp. 460-464, April 1989.

著 者 紹 介



姜 泰 遠(正會員)

1966年 1月 20日生. 1988年 2月
경북대학교 전자공학과 졸업. 1990
年 2月 포항공과대학 전자전기공학
과 석사학위 취득. 1990年 2月 ~
한국표준과학연구원 전자파연구실
연구원. 주관심분야는 안테나 및 전
파전파, 전자파 관련 측정표준, 유전율 및 투자율 측
정 등임.



鄭 樂 三(正會員)

1939年 4月 22日生. 1967年 2월
서울대학교 문리과대학 물리학과 이
학사. 1970年 6月 미국 Perdue
University 대학원 물리학과 이학
석사. 1973年 5月 미국 Perdue
University 대학원 물리학과 이학
박사 1973年 5月 ~ 1976年 6月 미국 Perdue
University. 물리학과 연구원. 1976年 7月 ~ 현재
한국표준과학연구원, 책임연구원. 1976年 7月 ~
1978年 5月 미국 NBS(국립표준국), 방문연구원.
1986年 8月 ~ 1987年 9月 미국 STX(NASA 위탁
연구소) 원격탐사부, 선임과학자. 주관심분야 시간주
파수 표준 및 측정기술, 전자파 표준 및 측정기술.