직접 비교법을 이용한 W-Band 밀리미터파 전력 표준 전달 시스템

A W-Band Millimeter-Wave Power Standard Transfer System Using the Direct Comparison Method

권재용 · 강태원 · 강진섭 · 이동준

Jae-Yong Kwon · Tae-Weon Kang · Jin-Seob Kang · Dong-Joon Lee

요 약

본 연구는 국내 최초로 개발된 직접 비교법을 이용한 W-band 밀리미터파 전력 표준 전달 시스템에 대한 것이다. 이 시스템은 75~110 GHz 대역에서 W-band 도파관형 전력감지기의 실효 효율과 교정 인자를 측정하기 위하여 개발되었다. 전력 표준 전달 시스템 구성의 핵심 요소인 방향성 결합기의 반사 특성 평가 기법을 소개하고 실험 결과를 보인다. 구현된 시스템을 이용하여 측정하고자 하는 전력감지기의 교정 인자 측정 결과를 보이고, 불확도 요인에 대하여 고찰한다. 측정 결과를 기준값과 비교하여 W-band 밀리미터파 전력 표준 전달 시스템에 의한 측정의 유효성을 검증한다.

Abstract

This paper introduces a W-band millimeter-wave power standard transfer system using the direct comparison method. The transfer system was developed to evaluate the effective efficiency and calibration factor of a W-band waveguide power sensor. The evaluation method and the measured results of the directional coupler that characterizes the calibration system are studied. The uncertainties of the standard transfer system are investigated, and the major uncertainty contributors are discussed as well. The performance of the realized W-band power standard transfer system was verified by comparing results with reference values.

Key words : Millimeter-Wave Power Standards, Directional Coupler, Direct Comparison Method, Reference Standard

I. 서 론

전자파전력은 전자파 측정량의 하나로 임피던스와 함께 대부분의 전자파 측정에 근간이 되는 중요한 기본 측정량이다^{[1],[2]}. 예를 들어 전자파 적합성(electromagnetic compatibility: EMC) 측정을 포함한

대부분의 안테나 측정은 안테나 종단에 전달된 전자파전력을 측정하기 위하여 전력감지기(power sensor)를 사용하므로 이의 정확한 평가는 필수적이다. 최근 W-band를 포함한 밀리미터파 대역의 전자파 측정 수요가 증가하여 전력감지기를 포함한 밀리미터파 전자파전력계(power meter)와 밀리미터파 신호

「이 논문은 2013년 한국표준과학연구원의 일반과제 ‘차세대 전자파 측정표준 기술개발’의 지원을 받아 연구되었음(한국표준과학연구원-13011011).」

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

· Manuscript received November 13, 2012 ; Revised December 18, 2012 ; Accepted December 28, 2012. (ID No. 20121113-128)

· Corresponding Author : Jae-Yong Kwon (e-mail : jykwn@kriss.re.kr)

모듈 등이 보급되고 있으나, 장비의 제작사에서는 측정 소급성(traceability)을 확보하지 못한 경우가 대부분이다. 이에 주요 국가의 측정표준대표기관(NMI: National Metrology Institute)에서는 W-band 이상 대역에서의 전자파전력 표준의 확립을 위하여 노력하고 있다. 일반적으로 전자파전력 표준의 확립은 해당 대역의 미소열량계(microcalorimeter)의 개발을 통하여 정확히 평가된 기준표준기(reference standard)를 확보하고, 이를 이용한 전자파전력 표준 전달 시스템을 확립하는 일련의 과정을 의미한다^{[3],[4]}. 국내의 W-band 이상 대역에 대한 전자파전력 표준 확립의 시급성을 고려하여 장기적으로는 미소열량계를 개발하여 확보할 예정이며, 동시에 단기적으로는 기 평가된 기준표준기를 확보하여 미소열량계의 확보 이전에 전자파전력 표준 전달 시스템을 구성하는 것을 목표로 하고 있다. 향후 해당 대역의 미소열량계가 완성되면 기준표준기의 자체적 평가를 통하여 전자파전력 표준의 독자적인 소급성을 가지게 된다.

전자파전력 표준 전달 시스템은 직접 비교법(direct comparison method)을 기반으로 구성되며, 이 방법^[5]은 구성이 비교적 간단하여 널리 사용되나, 기준표준기와 피측정 전력감지기를 서로 비교하므로 정확히 평가된 기준표준기의 확보가 필요하다. 일반적으로 기준표준기를 자체적으로 제작하여 평가할 수 없는 경우에 해당 전자파전력 표준이 확립된 NMI를 통하여 기준표준기를 평가받고, 이를 이용하여 표준을 유지하게 되는데 해당 기준표준기의 불확도가 모든 피교정 전력감지기에 전파되므로 이의 관리와 유지는 매우 중요하다^[6]. 본 논문에서 제시된 시스템에서는 영국 NPL(National Physical Laboratory, UK)에서 평가된 두 개의 전력감지기(Agilent W8486A)를 기준표준기로 사용한다.

II. W-Band 밀리미터파 전력 표준 전달 시스템

W-band 밀리미터파 전력 표준 전달 시스템은 그림 1과 같은 구성을 가지며, 피교정 전력감지기(DUT)의 실효 효율(η : effective efficiency)과 교정 인자(K: calibration factor)를 측정한다.

그림 1의 구성도를 상술하면 다음과 같다.

그림 1. 직접 비교법을 기초한 W-band 밀리미터파 전력 표준 전달 시스템의 주요 구성도

Fig. 1. The block diagram of the W-band millimeter-wave power standard transfer system based on the direct comparison method.

P_{STD1} : 1번 기준표준기(RS #1, STD1)를 측정 기준면(reference plane)에 장착하여 측정된 전력값

P_{DUT} : 피교정 전력감지기(DUT)를 측정 기준면에 장착하여 측정된 전력값

$P_{M,STD1}$: P_{STD1} 을 측정할 때 방향성 결합기의 3번 포트에 부착된 모니터링 전력감지기(M)로부터 측정된 전력값

$P_{M,DUT}$: P_{DUT} 을 측정할 때 방향성 결합기의 3번 포트에 부착된 모니터링 전력감지기(M)로부터 측정된 전력값

Γ_G : 방향성 결합기 2번 포트에 들어온 본 반사계수

Γ_{STD1} , Γ_{DUT} : 1번 기준표준기와 피교정 전력감지기의 반사계수

그림 2는 실제 구현된 W-band 밀리미터파 전력 표준 전달 시스템이다. 밀리미터파 신호 모듈(OML S10MS-AG-A)과 신호발생기(Agilent 8257D)는 짝을 이루어 W-band 밀리미터파 신호원이 된다. 3 포트 수동소자인 방향성 결합기(Millitech 3-port 10 dB)의 1번 포트를 신호원 측에 결합하고, 3번 포트에는 모니터링을 위한 W-band 도파관 전력감지기(Agilent W-8486A)를 장착한다. 방향성 결합기의 2번 포트는 기

준표준기(Agilent W8486A)와 피교정 전력감지기 (DUT)가 번갈아 장착되는 측정 기준면(reference plane)이 된다. 모니터링 전력감지기와 측정 기준면에 장착된 전력감지기의 계측값을 읽기 위하여 전자파 전력계(Agilent N1914A)가 사용되며, 주요 장비들은 컴퓨터에 의하여 제어된다. 시스템 구성에 사용되는 W-band 도파관은 WR10 규격으로 도파관의 높이와 폭이 각각 1.270 mm, 2.540 mm로 대단히 정밀한 정렬이 요구된다. 도파관 회로의 구성에 있어 부정확한 결합과 정렬은 임피던스 부정합을 의미하고, 이의 영향은 도파관의 크기가 작아질수록 커진다^[7]. 이에 도파관 회로로 인한 측정불확도를 최소화하기 위하여 정밀한 정렬이 가능한 광학기기용 부품 및 전용 설계 부품으로 시스템을 구성하였다. W-band 밀리미터파 전력 표준 전달 시스템을 이용한 측정과정은 다음과 같다. 우선 기준준표준기(RS #1)를 기준면에 장착하고, 이때의 모니터링 전력($P_{M,STD1}$)과 기준표준기에 전달된 전력(P_{STD1})을 전자파전력계로부터 동시에 읽어 저장한다. 다음으로 피교정 전력감지기(DUT)를 측정 기준면에서 연결하고 이때의 모니터링 전력($P_{M,DUT}$)과 DUT가 읽고 있는 전력값(P_{DUT})을 저장한다.

위의 측정값으로부터 실효 효율과 교정 인자는 다음의 관계식으로 정리된다^[5]. 이 때 전력감지기의 실효 효율은 전력감지기에 입사된 전자파전력과 전력감지기에 감지된 전자파전력의 비를 의미하며, 교정 인자는 전력감지기에 입사된 전자파전력 중에서 전력감지기의 반사로 인한 성분을 제외한 전자파전력과 전력감지기에 감지된 전자파전력의 비를 각각 의미한다.

$$\eta_{DUT} = \eta_{STD1} \times \frac{P_{DUT}}{P_{STD1}} \cdot \frac{P_{M,STD1}}{P_{M,DUT}} \times \frac{1 - |\Gamma_{STD1}|^2}{1 - |\Gamma_{DUT}|^2} \cdot \frac{|1 - \Gamma_{DUT} \Gamma_G|^2}{|1 - \Gamma_{STD1} \Gamma_G|^2} \quad (1)$$

$$K_{DUT} = \eta_{DUT} (1 - |\Gamma_{DUT}|^2) \quad (2)$$

Ⅲ. 방향성 결합기의 반사 계수 평가

그림 1과 같이 구성된 직접 비교법을 이용하는 전력 표준 전달 시스템은 시스템 구성에 사용된 방향

그림 2. W-band 밀리미터파 전력 표준 전달 시스템
Fig. 2. The W-band millimeter-wave power standard transfer system.

성 결합기의 특성을 평가하는 것이 매우 중요하다. 그림 2에서 사용된 방향성 결합기는 Millitech 사의 제품(CL3-10-R10)으로 최소 방향성(minimum directivity) 32 dB, 결합도(coupling value) 10 dB, 최대 삽입 손실 1.5 dB, 동작 주파수 대역의 결합도 변화가 ± 0.7 dB이다. 직접 비교법에 사용되는 방향성 결합기의 방향성이 높으면 포트 2의 반사(Γ_G)가 감소하므로 최소 방향성이 높은 제품을 선택하는 것이 좋다.

이때 기준표준기와 피교정 전력감지기의 측정 기준면이 되는 포트 2의 반사 특성은 본 시스템의 측정불확도를 결정하는 중요한 요소의 하나로 3-포트 방향성 결합기의 source mismatch로 불리며 다음과 같이 표현된다.

$$\Gamma_G = S_{22} - \frac{S_{12} S_{23}}{S_{13}} \quad (3)$$

2-포트의 벡터회로망 분석기로 3-포트 방향성 결합기의 특성을 측정할 때, S_{23} 의 측정을 위하여 방향성 결합기의 포트 1을 매칭하면 S_{23} 의 변화가 동반되므로 정확한 특성을 측정하기가 매우 어렵다.

이에 벡터회로망 분석기의 calibration 과정이 필요 없으며, 방향성 결합기의 포트 1을 매칭하지 않고도 Γ_G 를 측정할 수 있도록 제안된 방법이 “direct cali-

그림 3. W-band 도파관 방향성 결합기의 특성 측정 구성
Fig. 3. Measurement setup for the evaluation of a W-band waveguide directional coupler.

bration method"이다^{[8]~[10]}. 이 측정 방법은 회로망분석기의 특성해석에 사용되는 3항 오차 모델을 채용하고 있는데, 그림 3과 같이 구성된다^[11].

벡터회로망 분석기의 1번 포트에 방향성 결합기의 포트 1을 연결하고, 벡터회로망 분석기의 2번 포트에 방향성 결합기의 포트 3을 연결하며, 방향성 결합기의 포트 2, 즉 측정 기준면에 표준 반사기 기준기를 장착하여 측정을 한다. 이는 벡터회로망 내의 방향성 결합기를 포함하여 그림 4와 같이 나타낼 수 있으며, 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$\Gamma_X = \frac{\Gamma_m - e_{00}}{\Gamma_m e_{11} - \Delta_e} \quad (4)$$

이 때 e_{00} 는 directivity, e_{11} 는 source match, $e_{10}e_{01}$ 는 reflection tracking, $\Delta_e = e_{00}e_{11} - e_{10}e_{01}$, $\Gamma_m = b'_1/b'_3$ 이다.

결론적으로 그림 4의 구성에서 측정 기준면에 3개의 표준 반사기 기준기를 각각 장착한 후에 Γ_m 을 측정하면 3항의 오차항을 모두 유도할 수 있고, 다음의 결과를 얻을 수 있다.

$$\Gamma_G = e_{11} \quad (5)$$

그림 4. W-band 도파관 방향성 결합기의 특성 측정 구성
Fig. 4. Measurement setup for the evaluation of a W-band waveguide directional coupler.

그림 5. 그림 3 측정 구성에서 측정 기준면에 연결된 표준반사기에 따른 S 파라미터
Fig. 5. S-parameter of the measurement setup in Fig. 3 with standard reflection references on the reference plane.

그림 6. 측정 결과로부터 유도된 Γ_G
Fig. 6. Γ_G that derived from the measurement.

본 논문에서는 Agilent W11644A W-band WR10 calibration kit의 termination, short, offset-short가 3개의 표준 반사기준기로 사용되었으며, 각각의 Γ_X 값은 제작사에서 제공하는 표준값을 사용하였다. 그림 5는 측정 기준면에 표준 반사기로 termination과 short가 각각 연결되었을 때의 회로망분석기의 측정 결과이다. Offset-short의 연결 시 측정 결과는 공진주파수의 간격만 좁아질 뿐 short가 연결된 결과와 크게 다르지 않다. 그림 6은 그림 5의 결과를 이용하여 유도한 Γ_G 의 값으로 대부분의 주파수 대역에서 -30 dB 근방의 값을 보인다.

IV. 측정 결과

그림 2와 같이 구성된 W-band 밀리미터파 전력 표준 전달 시스템을 이용하여 동일 대역의 전력감지기(Agilent W8486A)를 평가해 보았다. 해당 전력감지기는 예비 표준기준기로 사용될 목적으로 NPL에서 특성이 평가되었고, 제작사의 교정 데이터도 확보되어 있는 것으로 새로이 구성된 전력 표준 전달 시스템의 유효성을 시험하기에는 아주 적절하다. 측정에 앞서 그림 7과 같은 제어 프로그램을 개발하여 안정적으로 측정될 수 있도록 신호원 출력 레벨 설정, 측정주기 조정 등을 수행하였다.

측정에 앞서 전력 표준 전달 시스템의 장기 안정도를 측정해 보았다. 모니터링 전력감지기와 기준표준기(RS #1) 전력감지기가 연결된 상태에서 약 3일 동안 6회에 걸쳐 75 GHz에서 110 GHz까지 대역에

그림 7. W-band 밀리미터파 전력 표준 전달 시스템 제어 프로그램

Fig. 7. Control program of the W-band millimeter-wave power standard transfer system.

그림 8. 도파관형 서미스터 마운트의 내부 구조
Fig. 8. Internal structure of a waveguide thermistor mount.

서 P_{STD1} 과 $P_{STD1}/P_{M,STD1}$ 를 관찰하였다. 관찰 결과에 의하면 두 값은 0.1 % 이하로 변동하여 대단히 안정적이었다. 특히 상대적인 값이 아닌 절대값 P_{STD1} 이 안정적이므로 전력 표준 전달 시스템의 온도 환경 및 밀리미터파 신호원이 안정적으로 유지됨을 확인할 수 있었다.

서미스터 마운트를 비롯한 도파관형 전력감지기의 내부 구조는 그림 8과 같이 정확한 대칭형이 아니므로 연결 방향에 따라 측정값이 조금씩 다르며, 각각 4개의 플랜지 나사(flange screw)와 정렬 핀(alignment pin)으로 연결하는 W-band 도파관의 특성상 나사의 연결 상태에 따라서도 변화가 있다^[7].

이에 본 기준기의 평가에 있어 기준표준기와 DUT의 연결 방향을 바꾸어가며 4가지 조합으로 측

표 1. 전력감지기 결합 방향의 조합

Table 1. Combination of the fastening direction of power sensors.

	#1	#2	#3	#4
기준표준기	up	up	down	down
DUT	up	down	up	down

(a) 위
(a) Up

(b) 아래
(b) Down

그림 9. 측정 기준면에 장착된 전력감지기의 결합 방향

Fig. 9. The fastening directions of power sensor on the reference plane.

정하였다. 표 1에서는 그림 9와 같이 전력감지기의 Type-N calibration port가 위로 향한 경우를 “up”이라 하고, 아래로 향한 경우를 “down”으로 칭한다.

그림 10은 표 1의 조합에 따라 각각 전력 표준 전달 시스템을 이용하여 측정한 후 교정 인자를 계산한 결과로 일부 주파수에서 결합 방향의 조합에 따라 차이가 있음을 볼 수 있다. 특히 결합 방향이 동일한 경우(#1, #4)와 다른 경우(#2, #3)는 특정 주파수에서 최대 1.5 %까지의 차이를 보였다. 동일 결합 방향 간의 반복도에 의한 최대 편차가 0.5 % 이내인 것을 볼 때 전력감지기의 비대칭성으로 인한 불확도 요인이 가장 크다고 할 수 있다.

그림 11은 본 논문에서 제안된 전력 표준 전달 시스템의 유효성을 검증하는 것으로, 그림 9의 4가지 조합에 따른 교정 인자의 평균치(CF-Avg)를 전력감지기의 제작사에서 제공하는 교정 인자(CF-Agilent) 및 NPL에서 평가 후 발행된 교정인증서의 교정 인자(CF-NPL)와 동시에 비교한 것이다. 전력 표준 전

그림 10. 전력감지기의 결합 방향 조합에 교정 인자
Fig. 10. Calibration factors with combination of the fastening direction of power sensors.

그림 11. W-band 밀리미터파 전력 표준 전달 시스템의 성능 검증

Fig. 11. Performance evaluation of the W-band millimeter-wave power standard transfer system.

달 시스템으로 평가된 교정 인자는 NPL에서 측정한 교정 인자와 ± 1.08 % 이내에서 잘 일치하는 우수한 결과를 보인다. 제작사의 교정 인자와 비교하면 구축된 전력 표준 전달 시스템으로 전력감지기의 교정 인자를 평가함으로써 최대 5 %까지 밀리미터파 전력 측정의 정확도를 개선할 수 있음을 보인다.

장기적으로는 anti-cocking 도파관의 적용 및 방향성 결합기의 방향성(directionality)에 의한 영향 등을 평가하여 측정불확도를 최소화하는 연구를 수행할 예정이다.

V. 결 론

본 논문에서는 국내 최초로 개발된 W-band 밀리

미터파 전력 표준 전달 시스템의 구성과 주요 특성을 보이고, 특히, 측정으로 인한 소자의 고유 특성변화를 피하면서 3-포트 방향성 결합기를 평가하는 방법을 제시하고 결과를 보였다. W-band 밀리미터파 전력 표준 전달 시스템의 실측 결과를 바탕으로 측정 불확도를 분석하고, 시스템의 성능을 검증하였다. 향후 본 시스템은 국내 W-band 밀리미터파 전력 표준 확립 및 보급에 활용될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] A. Fantom, "Radio frequency and microwave power measurement", *IEE Electrical Measurement*, Ser. 7, Peter Peregrinus Ltd., UK, 1990.
- [2] 권재용, 김정환, 강태원, "3.5 mm 동축형 미소열량계 개발과 전자파전력 측정표준 확립", 한국전자학회논문지, 20(9), pp. 989-996, 2009년 9월.
- [3] J. Y. Kwon, T. W. Kang, J. H. Kim, and J. S. Kang, "Development of a 3.5-mm coaxial microcalorimeter for RF and microwave power standards at KRISS," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 60, no. 7, pp. 2609-2614, Jul. 2011.
- [4] T. W. Kang, N. S. Chung, R. Honigbaum, J. Rühaak, 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.
- [5] M. P. Weidman, "Direct comparison transfer of microwave power sensor calibration", *NIST Technical Note 1379*, Jan. 1996.
- [6] Y. Shan, Y. S. Meng, and H. Neo, "Waveguide 50 ~ 110 GHz power sensor calibration system by direct comparison transfer," *CPEM2012 Conf. Digest*, pp. 94-95, Washington DC, USA, Jul. 2012.
- [7] A. R. Kerr, E. Wollack, and N. Horner, "Waveguide flanges for ALMA instrumentation", *ALMA Memo No. 278*, Nov. 1999.
- [8] A. Török, D. Janik, W. Peinelt, D. Stumpe, and U. Stumper, "Efficient broadband method for equivalent source reflection coefficient measurements," *IE-EE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 50, no. 2, pp. 361-363, Apr. 2001.
- [9] J. R. Juroshek, "A direct calibration method for measuring equivalent source mismatch", *Microwave Journal*, vol. 40, no. 10, pp. 106-118, Oct. 1997.
- [10] M. Rodriguez, "A semi-automated approach to the direct calibration method for measurement of equivalent source match", *ARMMS Conference*, Apr. 1999.
- [11] 이동준, 권재용, 소준호, 강노원, "반사 펄스의 주파수 해석을 이용한 광대역 3.5 mm 동축형 단일 포트 벡터 회로망 분석법", 한국전자학회논문지, 23(8), pp. 967-975, 2012년 8월.

권 재 용

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 책임연구원

[주 관심분야] 전자파 측정표준(전자파전력, EMC 안테나 등)

강 태 원

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

[주 관심분야] 전자파 측정표준(잡음, 전력), EMC 측정표준

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: Dept. of Electrical and Computer Eng., University of Illinois at Urbana-Champaign

Postdoctoral Research Associate

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

1998년 3월~현재: 한국표준과학연구원 전자파센터 책임연구원

[주 관심분야] 전자파 산란 및 역산란, 수치 해석, 안테나 해석, 전자파 측정 등

이 동 준

1995년 2월: 건국대학교 물리학과 (이학사)

1996년 2월: 건국대학교 전자공학과 (공학사)

1999년 1월: 미국 Polytechnic Univ. 전기전자공학과 (공학석사)

2008년 12월: 미국 Univ. of Michigan 전기전자공학과 (공학박사)

1999년 10월~2002년 8월: 삼성전자 무선사업부 선임연구원

2009년 2월~현재: 한국표준과학연구원 전자파센터 선임연구원

[주 관심분야] 전기광학 기반 안테나 측정, 초고출력 측정용 전기광학 센서 개발, 광기반 백터회로망 분석기 제작, 광기반 초고속 펄스 측정 시스템 개발