

# OTA 방사 성능의 고속 측정시스템의 RF 전력 측정장비 불확도 평가

## Evaluation of RF Power Measurement Equipment Uncertainty in an OTA-Based High-Speed Measurement System for Radiated Performance

박 하 진 · 신 통 화 · 오 순 수

Ha-Jin Park · Tong-Hwa Shin · Soon-Soo Oh

### 요 약

본 연구에서는 측정 시간을 수십 분대로 단축한 OTA(over-the-air) 기반 방사 성능(TRP, total radiated power) 측정 시스템에서 RF(radio frequency) 전력 수신 장비의 신뢰성 확보를 위해 RF power measurement equipment uncertainty를 평가하였다. 해당 항목은 수신 장비의 전력 측정 정확도와 안정성을 평가하는 지표로, 방사 성능 평가 결과의 신뢰성에 직접적인 영향을 미친다. A-type 표준불확도는 반복 측정을 통해 산출하였으며, B-type 표준불확도는 신호 발생기의 출력 정확도 사양을 기반으로 도출하였다. 이후 RSS(root sum square) 방법을 이용하여 합성 표준불확도를 계산하였다. 최종 합성 표준불확도는 0.64 dB로 나타났으며, 제안된 시스템이 측정 시간 단축에도 불구하고 신뢰성 있는 전력 측정 성능을 유지함을 확인하였다.

### Abstract

In this study, the uncertainty of radio frequency (RF) power measurement equipment was evaluated to ensure the reliability of RF power receiving equipment in an over-the-air (OTA)-based radiated performance total radiated power (TRP) measurement system that reduces measurement time to within tens of minutes. This metric serves as an indicator for evaluating the absolute power measurement accuracy and stability of the receiving equipment and directly affects the reliability of radiated performance evaluation results. The A-type standard uncertainty was obtained through repeated measurements, while the B-type standard uncertainty was derived from the absolute output accuracy specifications of the signal generator. The combined standard uncertainty was calculated using the root-sum-square (RSS) method. The final combined standard uncertainty was 0.64 dB, confirming that the proposed system maintains reliable power measurement performance despite the reduced measurement time.

Key words: Over-The-Air (OTA), Total Radiated Power (TRP), Measurement Uncertainty, RF Power, High-Speed Measurement System

### I. 서 론

모바일 트래픽 증가와 대용량 데이터 전송에 따른 전

파자원 수요가 급증함에 따라 5G-6G 서비스의 상용화가 추진되고 있다<sup>[1]</sup>. 전파자원은 주파수 대역, 시간, 공간과 같은 통신을 위해 할당, 관리되는 자원을 의미한다. 고주

「This work was supported by a project titled “Succeeding development of rapid measurement technique for antennas with new technology” of the National Radio Research Agency Korea. This work was supported by the Technology Development Program (RS-2026-25505040) funded by the Ministry of SMEs and Startups (MSS, Korea).」

조선대학교 전자공학과(Chosun University Electronic Engineering)

· Manuscript received April 9, 2026 ; Revised May 4, 2026 ; Accepted July 8, 2026. (ID No. 20260409-028)

· Corresponding Author: Soon-Soo Oh (e-mail: ssOH@chosun.ac.kr)

과 대역을 활용하는 차세대 이동통신 시스템에서는 대역 폭 확장과 다중 안테나 기술이 적용되면서, 단말 및 장비의 성능 검증에 대한 중요성이 더욱 증가하고 있다<sup>[2]</sup>. 이에 따라 전파자원의 효율적인 활용과 함께 장비의 방사 성능을 정확하게 평가하는 것이 필수적이다.

신기술 안테나가 적용된 제품은 방사 성능 및 빔포밍 성능 등을 종합적으로 평가해야 하므로 기존 대비 각 항목을 측정하기 위한 샘플 수가 증가하며, 이에 따라 측정 절차 또한 복잡해진다. 특히 EIRP(effective isotropically radiated power) 및 TRP(total radiated power)와 같은 OTA(over the air)기반 방사 성능 시험은 실제 동작 환경을 반영할 수 있다는 장점이 있으나, 전 방향 및 다양한 빔 상태에 대한 측정이 요구되어 측정 포인트 수가 크게 증가하여 측정 시간이 증가한다<sup>[3]</sup>.

이러한 OTA 기반 측정은 안테나와 RF 회로가 통합된 단말 구조에서 실제 방사 환경을 반영할 수 있다는 점에서 필수적인 평가 방법으로 활용된다. 특히 밀리미터파 5G NR(new radio) 단말의 RF 요구사항이 OTA 기반 측정을 통해 규정되며, 이에 따라 방사 성능 기반 평가의 중요성이 강조되고 있다<sup>[4]</sup>.

기존 방식의 방사 시험은 시험시간이 수백 시간에 달하며, 이로 인해 시험 장비 점유시간이 길어지고, 전파자원 활용 측면에서 비효율이 발생한다. 또한 장시간의 시험은 환경변화와 드리프트 등의 영향으로 측정 결과의 일관성을 유지하기 어렵다는 문제 역시 존재한다. 이러한 기존 방사시험 방식은 빠른 평가가 요구되는 최신 트렌드에 효과적으로 대응하는 것에 대해 한계를 가진다.

기존 3GPP 문서의 불확도 평가는 정해진 quiet zone 조건을 만족하는 OTA 시험 환경에서의 TRP 측정불확도를 산정하는 데 초점을 두고 있으나 본 연구에서 다루는 시스템은 DUT가 quiet zone 중심에 위치하여 측정하는 기존 구조가 아니라, 고속 측정을 목적으로 자체적으로 구성된 측정 시스템의 측정불확도 산정 시스템이라는 데에 차이가 있다. 이 논문에서는 3GPP의 측정불확도 산출 방법을 참고하되 실제 제작 시스템의 측정 구조와 자체 제작한 수신장비라는 점을 반영하여 분석을 수행하였다.

이와 같은 문제를 해결하기 위해 최근에는 측정 시간을 단축하는 고속 측정 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되

고 있다. 그러나 측정 시간 단축 시에도 측정 데이터의 신뢰성과 정확도가 기존 방식과 동일한 수준으로 유지되는지에 대한 검증이 필수적이다. 특히 수신 장비의 전력 측정 정확도는 전체 방사 성능 평가 결과에 직접적인 영향을 미치므로, 이에 대한 정량적인 평가가 요구된다.

기존 연구에서는 OTA 고속 측정 시스템을 구축하고, 시스템의 성능과 측정 신뢰성을 평가하기 위해 3GPP TR 38.810에 제시된 측정불확도 항목을 기반으로 전체 불확도 평가를 수행하였다. 전체 평가 항목 중 본 연구에서는 수신 전력 측정과 관련된 RF 전력 측정 장비의 불확도를 대상으로 하였다. 반복 측정값을 이용한 A형 평가와 측정 장비 사양을 이용한 B형 평가를 수행하고, 이를 통해 수신 전력 측정의 불확도를 산정하였다<sup>[1]</sup>.

따라서 본 논문에서는 새로이 제시되는 고속 측정 시스템의 안정성을 평가하기 위해 측정 불확도 항목 중 RF measurement equipment uncertainty에 주목하였다. 해당 항목은 수신 장비가 입력 전력을 얼마나 정확하고 안정적으로 측정하는지를 평가하는 지표로, 측정 시스템의 신뢰성을 판단하는 데 중요한 요소이다.

본 연구에서는 RF power measurement equipment uncertainty 항목에 대한 산출 절차와 평가 방법 및 결과를 제시하고, 반복 측정을 기반으로 한 A-type 불확도와 장비 사양 기반의 B-type 불확도를 함께 고려하여 합성 표준 불확도를 도출한다. 이를 통해 제안된 고속 측정 시스템이 짧은 측정 시간 내에서도 안정적인 전력 측정 성능을 유지할 수 있는지 검증한다.

## II. 측정 이론 및 원리

EIRP 및 TRP 시험에서 수신 장치는 DUT(device under test)로부터 방사된 신호를 수신하여 전력 레벨로 측정한다. 수신된 전력 값은 변동성을 가지는 측정값으로 간주할 수 있으며, 반복 측정을 통해 얻어진 데이터는 통계적 분석의 대상으로 활용된다. 이때 사용되는 수신 장치는 스펙트럼 분석기, 통신 분석기 또는 파워미터가 될 수 있으며, 각 장비는 신호의 절대 전력 레벨을 측정하는 역할을 한다. 따라서 측정 결과의 신뢰성은 수신 장비의 성능, 설정 조건 등에 따라 영향을 받을 수 있다. 이러한 이유로

TRP 측정 결과를 해석하기 위해서는 수신 장비 자체의 절대 전력 측정 정확도를 고려할 필요가 있다. 이는 전체 방사 측정 결과의 정확도를 결정하는 핵심 요소이다.

RF power measurement equipment uncertainty 항목은 OTA 측정 시스템의 여러 불확도 요인 중 수신 장비가 입력 전력을 얼마나 정확하고 안정적으로 측정하는지를 평가하는 항목이다. TRP 방사 성능 평가는 수신된 신호의 절대전력 값을 기준으로 실시되므로 수신 장치의 측정 편차는 전체 측정 결과의 신뢰성에도 직접적인 영향을 미친다. 따라서 해당 항목의 평가는 고속 측정 시스템의 성능을 검증하기 위한 기본 단계로 볼 수 있다. 본 연구에서의 RF power measurement equipment uncertainty 평가는 전체 측정 시스템이 아닌 RF 수신 체인에 한정하여 평가하였다. 측정불확도는 측정 결과의 신뢰성을 정량적으로 평가하기 위한 지표로, 측정 과정에서 발생할 수 있는 다양한 오차 요인을 통계적으로 표현한 값이다<sup>[5]</sup>. 일반적으로 측정불확도는 GUM(guide to the expression of uncertainty in measurement)에서 제시된 방법을 기반으로 수행되며, 반복 측정을 통해 산출되는 A-type 평가와 장비 사양이나 기존 정보에 기반한 B-type 평가로 구분된다.

본 연구에서는 이 중 반복 측정을 통해 산출되는 A-type 표준 불확도를 중심으로 수신기의 측정 안정성을 평가하였으며, 이후 장비 사양으로부터 반영되는 B-type 표준 불확도와 함께 합성 표준 불확도를 산출하는 절차를 적용하였다.

반복 측정을 이용한 불확도 평가는 동일한 측정 조건에서 수행되어야 한다. 입력 신호 설정, DUT와 프로브의 상대적 위치, 수신기 설정 등 주요 조건이 일정하게 유지된 상태에서 관측되는 전력 값의 변동은 수신 장비 및 측정 시스템의 단기 안정성을 반영한다<sup>[6]</sup>. 따라서 반복 측정을 기반으로 한 A-type 불확도 평가는 수신기의 재현성과 측정 안정성을 평가하는 데 적절하다.

전력 측정을 수행할 때에는 측정 대역폭, 분해능 대역폭 및 검파 방식 등 주요 설정값이 적절히 설정되어야 하며, 일반적으로 장비 사양에 따른 오차 요인이 존재한다. 그러나 본 연구에서는 자체 제작된 수신기를 사용하여 제조사 사양 기반의 불확도 항목을 적용하기 어려우므로, 해당 요인은 B-type 불확도에서 제외하였다. 대신 반복

측정을 기반으로 A-type 불확도를 평가하여 수신기의 영향을 반영하였다.

본 연구에서는 수신기의 측정정확도를 평가하기 위하여 동일한 측정 조건에서 전력 측정을 반복 수행하였다. 동일한 입력 신호에 대해 반복적으로 측정된 전력 값의 변동성은 수신기의 측정 재현성을 나타내며, 이를 통해 측정 안정성을 평가할 수 있다. 본 연구에서는 각 11개의 프로브에 대해 전력 측정을 10회 반복 수행하였으며, 측정 결과로부터 평균과 표준편차를 산출하였다. 본 연구에서의 불확도 산정은 복소 신호의 크기 및 위상 성분을 대상으로 한 것이 아닌 수신기에서 출력되는 절대전력값의 측정 편차를 대상으로 수행되었다. 반복 측정을 통해 얻어진 전력 값  $x_i$ 의 집합에 대해 평균과 표준편차를 산출하였다.  $x_i$ 는 측정 잡음 및 시스템의 변동에 의해 확률적 특성을 가지는 확률 변수로 간주할 수 있다. 이때 표준편차는 측정값의 통계적 분산을 나타내며, 다음과 같이 정의된다. 여기서  $n$ 은 측정 횟수이며,  $\bar{x}$ 는 측정값의 평균을 의미한다.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

표준편차  $s$ 는 측정값의 산포를 나타내며, 반복 측정된 평균값의 불확도는  $s/\sqrt{n}$ 으로 표현된다. 여기서 반복 측정으로부터 얻어지는 표준편차는 개별 측정값의 산포를 나타내며, 이를 반복 횟수의 제곱근으로 나눈 값은 평균 측정값에 대한 표준불확도로 해석된다. 즉, 동일 조건에서 여러 번 측정한 결과가 얼마나 일관되게 수렴하는지를 정량적으로 나타내는 값으로서, 수신기의 측정 재현성을 평가하는 지표가 된다.

반복 측정 결과로부터 산출된 표준편차는 측정값의 변동성을 나타내며, GUM에서 정의하는 A-type 불확도 평가에 활용된다. 본 연구에서는 각 프로브에 대하여 계산된 표준편차를 반복 횟수의 제곱근으로 나눠 A-type 표준 불확도를 산출하였으며, 이를 수신기의 전력 측정 안정성을 나타내는 지표로 사용하였다. 이를 통해 제안된 고속 측정 시스템이 짧은 측정 시간 내에서도 안정적인 전력 측정이 가능한지를 평가하고자 하였다.

합성 표준 불확도는 필요에 따라 신뢰구간을 고려한 확장불확도로 변환될 수 있으며, 일반적으로는 95 % 신뢰수준을 가정하여 coverage factor  $k=2$ 를 적용한다. B-type 불확도의 경우 제조사에서 제시하는  $\pm a$  형태의 허용 오차는 신뢰구간을 포함하는 값으로 간주되며, 이를 표준 불확도로 변환하기 위해  $u = \frac{a}{\sqrt{3}}$ 으로 표현한다. 이를 통해 산출된 확장 불확도는 실제 측정 결과가 포함될 것으로 기대되는 범위를 의미하며, 측정 시스템의 신뢰성을 해석하는 지표로 활용된다.

서로 독립적인 불확도 성분은 일반적으로 RSS(root-sum-square) 방법을 이용하여 합성 표준 불확도로 계산된다. 이는 각 불확도 성분이 분산의 합으로 결합된다는 가정에 기반하며, 전체 불확도는 개별 불확도 분산의 합으로 표현된다. 본 연구에서는 반복 측정을 통해 산출된 A-type 표준 불확도와 장비 사양 기반의 B-type 표준 불확도를 RSS 방식으로 결합하여 합성 표준 불확도를 산출하였다.

이러한 불확도 평가 방법은 제안된 고속 측정 시스템의 전력 측정 성능을 분석하는 데 활용된다<sup>7)</sup>.

### III. 측정결과 및 분석

측정은 챔버 내에서 수행되었으며, 내부 벽면에는 흡수체를 부착하여 외부 전자파 유입 및 다중 반사 영향을 최소화하였다. 이를 통해 환경 요인에 의한 전력 변동을 억제하고, 측정 시스템 자체의 반복성 및 안정성을 확보하였다. 그림 1은 본 연구에서 사용된 측정 환경을 나타낸다.

본 측정에는 Rohde & Schwarz 사의 R&S®SMW200A vector signal generator, 외부 제작 수신기, 외부 제작 케이블 및 내부 제작한 측정 프로브가 사용되었다. SG는 송신 신호를 인가하기 위한 장비로 사용되었으며, 수신기는 본 측정 시스템을 위해 제작된 장비이다.

시스템은 11개의 프로브가 구면을 따라 부착되어 있으며, 시작 각도는 7.5도, 그 이후로 각각 15도 간격으로 배열되어 있다. 신호 발생기의 출력은 28 GHz, -2 dBm로 설정하였으며, 측정 과정 동안 해당 출력 조건을 유지하



그림 1. 측정환경

Fig. 1. Measurement environment.

였다. 발생한 신호는 케이블을 통해 DUT에 인가되었고, DUT로부터 방사된 신호는 11개의 프로브를 통해 수신되었다. 그림 2는 측정 시스템 구성과 RF 체인 경로를 나타낸다.

측정은 캘리브레이션 지그를 이용하여 DUT를 회전시켜 각 프로브와 정렬되도록 한 후 순차적으로 수행하였다. 각 프로브에서 수신된 신호는 자체 제작 수신기를 통해 채널 파워(channel power) 방식으로 측정되었으며, 채널 파워는 설정된 대역폭 내에서 적분된 평균 전력으로 정의된다. 그림 3은 채널 파워 측정 과정을 나타낸다.

각 측정은 동일한 입력 조건과 환경 조건에서 수행되었으며, 장비 설정값과 측정 시간 간격을 일정하게 유지하였다. 또한 각 프로브에 대해 V-pol 및 H-pol, 프리앰프

RF chain:

Probe → Switch matrix → LNA → Measurement receiver

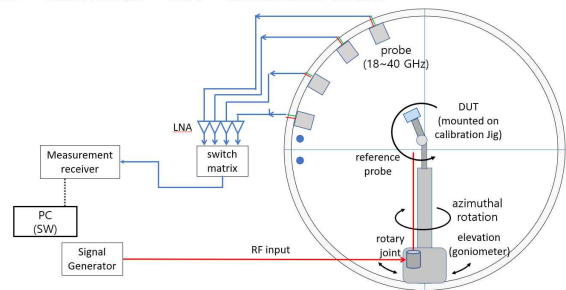


그림 2. RF 측정 시스템 및 RF chain 경로

Fig. 2. RF measurement system and RF chain path.

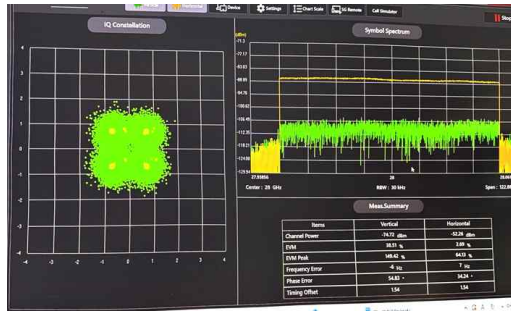


그림 3. 측정화면  
Fig. 3. Measurement screen.

가 켜져있을 때와 꺼져있을 때에 관해 각각 10회 반복 측정을 수행하여 측정 결과의 재현성과 안정성을 확보하였다. 이때, 프리앰프 off 상황에서 H-pol의 2번과 8번 프로브의 불확도가 높게 나왔는데 이는 정렬문제일 것으로 사료된다(표 1~표 4).

반복 측정을 통해 얻은 수신전력 값으로부터 평균과 표준편차를 산출하였다. 이때 표준편차는 반복 측정으로 인해 얻은 통계적 변동성을 나타내며, 이를 기반으로 A-type 표준불확도로 산출하였다.

A-type 표준불확도  $u_A$ 를 산출하는 식은 다음과 같다. 여기서  $s$ 는 반복 측정값의 표준편차이며,  $n$ 은 반복 측정 횟수

를 의미한다. A-type 표준불확도는 식 (2)와 같이 정의된다.

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

채널파워(channel power)는 특정 대역폭 내에서 수신된 신호 전력을 적분하여 산출되는 값으로, 본 연구에서는 각 프로브에서 측정된 전력 값을 비교하기 위한 기준으로 사용하였다.

각 수신기의 채널 파워 측정 결과 불확도 값은 대부분 그림 4에서와 같이 0.001~0.003 dB 수준으로 나타났다. 이는 반복 측정에 따른 전력 변동성이 전반적으로 낮음을 의미하며, 수신기의 단기 안정성이 양호한 수준임을 나타낸다. 또한, 불확도 값은 계산 과정에서 더 많은 유효 자릿수를 가지지만, 분석의 편의성을 위해 소수점 셋째 자리까지만 반올림하여 표시하였다. 하지만 전체적으로 낮은 변동성을 보여 안정성은 양호한 수준으로 평가된다.

표 5는 B Type 표준불확도 산정에 사용한 인자를 나타낸다. 본 연구에서는 단일불확도 인자만을 적용하였으므로 인자 간 상관관계는 고려하지 않았다. 또한 B형 표준불확도는 KRISS 문서 4.3절을 고려하여 산정하였다<sup>[8]</sup>. 송신기 출력 레벨에 대한 Type B 불확도 성분을 제조사 데이터시트에 제시된 R&S®SMW200A의 level error 항목을

표 1. V-pol에서의 채널 파워 측정값(단위: dBm)

Table 1. Channel power measurement at V-pol (unit: dBm).

| Probe No. | Measurement No. |        |        |        |        |        |        |        |        |        | Uncertainty (dB) |
|-----------|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------|
|           | 1               | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |                  |
| 1         | -50.36          | -50.35 | -50.36 | -50.36 | -50.35 | -50.35 | -50.34 | -50.36 | -50.46 | -50.35 | 0.011            |
| 2         | -53.47          | -53.46 | -53.47 | -53.46 | -53.48 | -53.46 | -53.47 | -53.46 | -53.48 | -53.48 | 0.002            |
| 3         | -53.78          | -53.78 | -53.81 | -53.79 | -53.78 | -53.78 | -53.77 | -53.78 | -53.78 | -53.79 | 0.003            |
| 4         | -53.45          | -53.44 | -53.43 | -53.43 | -53.44 | -53.43 | -53.43 | -53.44 | -53.45 | -53.43 | 0.002            |
| 5         | -50.16          | -50.16 | -50.15 | -50.15 | -50.16 | -50.15 | -50.17 | -50.15 | -50.16 | -50.15 | 0.002            |
| 6         | -50.69          | -50.68 | -50.69 | -50.68 | -50.7  | -50.68 | -50.69 | -50.67 | -50.69 | -50.68 | 0.003            |
| 7         | -52.06          | -52.06 | -52.04 | -52.03 | -52.05 | -52.05 | -52.04 | -52.05 | -52.05 | -52.04 | 0.003            |
| 8         | -51.49          | -51.48 | -51.47 | -51.47 | -51.48 | -51.47 | -51.47 | -51.46 | -51.47 | -51.48 | 0.003            |
| 9         | -51.31          | -51.29 | -51.31 | -51.31 | -51.31 | -51.31 | -51.29 | -51.31 | -51.31 | -51.3  | 0.003            |
| 10        | -51.75          | -51.74 | -51.74 | -51.74 | -51.74 | -51.73 | -51.74 | -51.74 | -51.73 | -51.73 | 0.002            |
| 11        | -52.31          | -52.33 | -52.31 | -52.31 | -52.3  | -52.3  | -52.31 | -52.29 | -52.28 | -52.3  | 0.004            |

표 2. H-pol에서의 채널 파워 측정값(단위: dBm)

Table 2. Channel power measurement at H-pol (unit: dBm).

| Probe No. | Measurement No. |        |        |        |        |        |        |        |        |        | Uncertainty (dB) |
|-----------|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------|
|           | 1               | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |                  |
| 1         | -52.24          | -52.25 | -52.25 | -52.24 | -52.25 | -52.25 | -52.25 | -52.26 | -52.25 | -52.26 | 0.002            |
| 2         | -53.47          | -53.74 | -53.74 | -53.74 | -53.74 | -53.74 | -53.72 | -53.73 | -53.74 | -53.74 | 0.026            |
| 3         | -53.78          | -53.78 | -53.81 | -53.79 | -53.78 | -53.78 | -53.77 | -53.78 | -53.77 | -53.78 | 0.011            |
| 4         | -53.45          | -53.45 | -53.44 | -53.43 | -53.44 | -53.43 | -53.45 | -53.44 | -53.45 | -53.43 | 0.008            |
| 5         | -50.16          | -50.16 | -50.16 | -50.15 | -50.15 | -50.15 | -50.17 | -50.15 | -50.16 | -50.15 | 0.007            |
| 6         | -51.28          | -51.28 | -51.27 | -51.28 | -51.27 | -51.28 | -51.28 | -51.28 | -51.29 | -51.27 | 0.006            |
| 7         | -52.18          | -52.17 | -52.18 | -52.18 | -52.18 | -52.19 | -52.19 | -52.16 | -52.18 | -52.18 | 0.008            |
| 8         | -50.8           | -50.89 | -50.87 | -50.87 | -50.87 | -50.88 | -50.88 | -50.87 | -50.88 | -50.88 | 0.025            |
| 9         | -52.3           | -52.3  | -52.29 | -52.29 | -52.29 | -52.28 | -52.28 | -52.31 | -52.29 | -52.29 | 0.009            |
| 10        | -51.67          | -51.68 | -51.66 | -51.67 | -51.67 | -51.66 | -51.66 | -51.67 | -51.69 | -51.67 | 0.009            |
| 11        | -51.47          | -51.48 | -51.47 | -51.47 | -51.47 | -51.47 | -51.46 | -51.46 | -51.47 | -51.47 | 0.006            |

표 3. 프리앰프 ON 상태의 V-pol에서의 채널 파워 측정값(단위: dBm)

Table 3. Channel power measurement value at V-pol in preamplifier ON state (unit: dBm).

| Probe No. | Measurement No. |        |        |        |        |        |        |        |        |        | Uncertainty (dB) |
|-----------|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------|
|           | 1               | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |                  |
| 1         | -50.43          | -50.43 | -50.43 | -50.43 | -50.43 | -50.43 | -50.43 | -50.43 | -50.43 | -50.43 | 0                |
| 2         | -51.69          | -51.68 | -51.67 | -51.67 | -51.67 | -51.67 | -51.67 | -51.66 | -51.66 | -51.67 | 0.003            |
| 3         | -51.46          | -51.46 | -51.46 | -51.46 | -51.46 | -51.45 | -51.45 | -51.45 | -51.45 | -51.46 | 0.002            |
| 4         | -52.56          | -52.56 | -52.55 | -52.55 | -52.55 | -52.55 | -52.55 | -52.55 | -52.55 | -52.55 | 0.001            |
| 5         | -50.66          | -50.66 | -50.66 | -50.65 | -50.65 | -50.65 | -50.65 | -50.65 | -50.65 | -50.65 | 0.002            |
| 6         | -51             | -50.99 | -50.99 | -50.99 | -50.99 | -50.99 | -50.99 | -50.99 | -50.99 | -50.99 | 0.001            |
| 7         | -52.19          | -52.19 | -52.19 | -52.19 | -52.19 | -52.19 | -52.19 | -52.19 | -52.19 | -52.19 | 0                |
| 8         | -51.23          | -51.22 | -51.22 | -51.22 | -51.22 | -51.22 | -51.21 | -51.21 | -51.21 | -51.21 | 0.002            |
| 9         | -50.72          | -50.72 | -50.71 | -50.71 | -50.71 | -50.71 | -50.71 | -50.71 | -50.71 | -50.71 | 0.001            |
| 10        | -51.12          | -51.12 | -51.11 | -51.12 | -51.12 | -51.12 | -51.12 | -51.11 | -51.11 | -51.12 | 0.002            |
| 11        | -51.84          | -51.84 | -51.84 | -51.84 | -51.84 | -51.84 | -51.84 | -51.84 | -51.84 | -51.84 | 0                |

기준으로 산정하였다. 해당 항목은 주파수 구간에 따른 출력 레벨 오차를 포함하여 제시된 값이므로, 기존에 전력 정확도와 주파수 의존 정확도를 별도 성분으로 구분하여 적용한 부분은 중복 반영을 방지하기 위해 단일 항목으로 수정하였다.

측정 주파수 약 28 GHz 조건에서 송신기의 출력 레벨 오차는 데이터시트의 해당 주파수 구간 값을 적용하였으며, 이를 직사각형 분포로 가정하여 표준불확도로 변환하였다. 수신기의 경우 본 측정 시스템을 위해 제작된 자체 제작 장비로, 세부 사양 및 교정성적서를 확보할 수 없어

표 4. 프리앰프 ON 상태의 H-pol에서의 채널 파워 측정값(단위: dBm)

Table 4. Channel power measurement value at H-pol in preamplifier ON state (unit: dBm).

| Probe No. | Measurement No. |        |        |        |        |        |        |        |        |        | Uncertainty (dB) |
|-----------|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------|
|           | 1               | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |                  |
| 1         | -52.28          | -52.27 | -52.27 | -52.26 | -52.26 | -52.26 | -52.26 | -52.26 | -52.26 | -52.26 | 0.002            |
| 2         | -52.39          | -52.39 | -52.39 | -52.39 | -52.39 | -52.38 | -52.39 | -52.38 | -52.38 | -52.39 | 0.002            |
| 3         | -52.47          | -52.49 | -52.48 | -52.48 | -52.48 | -52.48 | -52.48 | -52.48 | -52.48 | -52.47 | 0.002            |
| 4         | -56.2           | -56.19 | -56.19 | -56.19 | -56.19 | -56.19 | -56.19 | -56.19 | -56.19 | -56.19 | 0.001            |
| 5         | -50.24          | -50.25 | -50.24 | -50.24 | -50.24 | -50.23 | -50.23 | -50.23 | -50.23 | -50.24 | 0.002            |
| 6         | -51.6           | -51.6  | -51.6  | -51.6  | -51.6  | -51.59 | -51.59 | -51.59 | -51.6  | -51.6  | 0.002            |
| 7         | -51.97          | -51.96 | -51.96 | -51.96 | -51.95 | -51.95 | -51.95 | -51.95 | -51.95 | -51.95 | 0.002            |
| 8         | -50.67          | -50.67 | -50.67 | -50.67 | -50.67 | -50.67 | -50.67 | -50.67 | -50.67 | -50.67 | 0.0              |
| 9         | -51.94          | -51.94 | -51.94 | -51.94 | -51.93 | -51.93 | -51.93 | -51.93 | -51.93 | -51.93 | 0.002            |
| 10        | -51.44          | -51.45 | -51.44 | -51.44 | -51.45 | -51.45 | -51.45 | -51.45 | -51.44 | -51.44 | 0.002            |
| 11        | -51.3           | -51.3  | -51.3  | -51.29 | -51.3  | -51.3  | -51.29 | -51.29 | -51.29 | -51.29 | 0.002            |

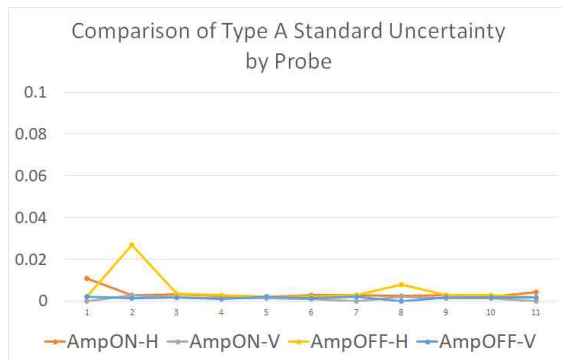


그림 4. 프로브별 A-type 표준불확도 비교

Fig. 4. Comparison of A-type standard uncertainty by probe.

표 5. B-type 표준불확도 인자 표

Table 5. B-type standard uncertainty factor table.

| Factor                    | Uncertainty value | Distribution              | Standard uncertainty |
|---------------------------|-------------------|---------------------------|----------------------|
| Measurement repeatability | 1.1               | Rectangular( $\sqrt{3}$ ) | 0.64                 |

별도의 type B 불확도 성분으로 산정하지 않았다.

A type 표준 불확도와 B type 표준 불확도를 GUM에서 제시하는 불확도 성분의 합성 원칙에 따라 합성표준불확도를 산정하였다<sup>[9]</sup>.

반복 측정 결과, 각 프로브에서 측정된 파워 값은 비교적 작은 범위 내에서 분포하였으며, 대부분의 표준편차가 0.1 dB 이하로 나타났다. 이는 동일한 입력 조건에서 측정 시스템이 일정한 출력값을 유지하고 있음을 의미한다. 또한, 프로브 위치에 따라 일부 전력 편차가 발생하였으나, 전체적인 경향에서는 큰 변동 없이 균일한 분포를 보였다. 이러한 결과는 측정 시스템의 반복성 및 재현성이 확보되었음을 보여주는 지표로 해석될 수 있으며, 동시에 측정 시스템이 공간적으로도 안정적인 특성을 유지하고 있음을 나타낸다.

반복 측정으로부터 산출된 표준편차를 기반으로 계산한 A-type 표준 불확도는 각 프로브에서 산출된 값 중 최대값을 적용하여 전체 시스템의 불확도를 보수적으로 평가하였다. 각각의 포트의 불확도를 합산하지 않고 최대값을 사용하는 이유는, 불확도를 합산할 시에 수치가 높은 결과값이 그렇지 않은 결과 값에 희석되어 불확도를 도출하는 의미가 흐려지는 것을 방지하기 위함이다. 그 값과  $u_B$ 를 RSS 방식으로 합성하여 합성 표준불확도  $u_c$ 를 산출하였다. 계산 결과 합성 표준불확도는 약 0.64 dB 수준으로 도출되었다<sup>[10]</sup>. 합성 표준불확도는 식 (3)과 같이 계산된다.

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (3)$$

이는 불확도가 장비 사양에 따른 영향을 포함하고 있음을 보여주며, 측정 시스템 자체의 반복성 및 안정성은 양호한 수준으로 유지하고 있음을 의미한다. 해당 기준은 표준문서인 3GPP에서 제시하는 실험 값인 1.08을 기준으로 설명되었다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 28 GHz 대역에서 채널 파워를 반복 측정 및 장비 사양을 고려하여 측정불확도를 평가하였다. 챔버 환경에서 SG 출력 -2 dBm의 조건을 유지한 상태로 11개 프로브에 대해 채널 파워 측정을 반복적으로 수행하였다. 반복 측정으로부터 산출된 표준편차를 기반으로 A-type 표준불확도를 계산하였으며 그중 가장 보수적인 값을 대표 불확도로 채택하였다. 또한 SG의 출력 정확도( $\pm 1.1$  dB)와 주파수 의존 정확도( $\pm 1.1$  dB)를 합산하여 B-type 표준불확도로 환산하였다. 이후 A-type 및 B-type 표준불확도를 RSS 방식으로 합성하여 최종 표준불확도를 산출하였으며 그 값은 0.64 dB이다.

이러한 결과는 반복 측정에 기인한 불확도는 낮은 수준임을 보여주며, 최종적으로 나타나는 불확도 값은 주로 장비 정확도에 의해 나타나는 것으로 보인다. 따라서 본 측정 시스템의 수신기는 반복성 측면에서 안정적인 특성을 보이며, 장비 사양을 포함한 평가를 통해 신뢰성을 확보 가능함을 확인하였다.

또한 다수의 프로브를 이용한 반복 측정 결과가 일정 범위 내에서 일관되게 수렴하는 것을 통해 제안된 고속 측정 시스템이 공간적으로도 안정적인 측정 특성을 유지함을 확인할 수 있었다. 이는 기존 장시간 방사시험 방식 대비 측정 시간을 크게 단축하면서도 측정 결과의 신뢰성을 유지할 수 있음을 의미한다.

나아가 본 연구에서 적용한 불확도 평가 방법은 고속 측정 시스템의 성능 검증을 위한 유효한 기준으로 활용될 수 있으며, 향후 다양한 주파수 대역 및 측정 환경에 대한 확장 적용이 가능할 것으로 판단된다. 또한 장비 특성 및 환경 요인을 추가적으로 고려한 불확도 분석을 통해 보다

정밀한 평가 체계로 발전시킬 수 있을 것으로 기대된다.

또한 본 연구 결과는 고속 측정 시스템의 실용적인 적용 가능성을 제시하며, 기존 장시간 측정 방식 대비 효율성과 신뢰성을 동시에 확보할 수 있는 대안으로 활용될 수 있음을 시사한다.

#### References

- [1] National Radio Research Agency, "Follow-up study on high-speed measurement technology for antennas applying new technologies," Final Rep. 11-1721137-100012-01, Dec. 2025.
- [2] T. S. Rappaport, S. Sun, R. Mayzus, H. Zhao, Y. Azar, and K. Wang, "Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!," *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335-349, May 2013.
- [3] Y. Qi, G. Yang, L. Liu, A. Orlandi, and H. Kong, "5G over-the-air measurement challenges: Overview," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 59, no. 6, p. 7, Dec. 2017.
- [4] *Study on Test Methods for OTA Performance of NR User Equipment (UE)*, TR 38.810 V16.7.0, Jun. 2023.
- [5] *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, ISO/IEC Guide 98-3, Oct. 2008.
- [6] *IEEE Recommended Practice for Antenna Measurements*, IEEE Std. 149-2021, Feb. 2022.
- [7] *Guidelines for Estimating Measurement Uncertainty in Testing*, KOLAS-G-004, Jan. 2024.
- [8] *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, ISO/IEC Guide 98-3:2008, GUM:1995, KRISS/SP-2010-105, Jan. 2011.
- [9] *Uncertainty of Measurement - Part 3: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM:1995)*, 1st ed. ISO/IEC Guide 98-3:2008, Oct. 2008.
- [10] *Guidelines for the Estimation and Expression of Measurement Uncertainty*, KOLAS-G-001, Jan. 2024.

박 하 진 [조선대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0008-5515-5129>



2026년 2월: 조선대학교 전자공학과 (공학사)

2026년 3월 ~ 현재: 조선대학교 전자공학과 석사과정

[주 관심분야] 안테나 측정시스템, 측정불확도 등

오 순 수 [조선대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-2913-4654>



1998년 2월: 인하대학교 전자공학과 (공학사)

2000년 2월: 인하대학교 전자통신공학과 (공학석사)

2000년 8월: 고려대학교 초고주파 및 광파공학과 (공학박사)

2003년 9월 ~ 2013년 4월: University of Manitoba, Post-Doc, Fellow

2005년 5월 ~ 2013년 8월: 한국전자통신연구원 전파기술연구부 선임연구원

2013년 9월 ~ 현재: 조선대학교 전자공학과 교수

[주 관심분야] 안테나 측정 시스템, 전파전파, 배열 안테나 등

신 통 화 [조선대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0001-0573-0120>



2025년 2월: 조선대학교 전자공학과 (공학사)

2025년 3월 ~ 현재: 조선대학교 전자공학과 석사과정

[주 관심분야] 안테나 측정시스템, 밀리미터파, 도파관 등