

원전계와 컴팩트 레인지 안테나 이득 측정 불확도 비교 연구

Comparative Analysis of Antenna Gain Measurement Uncertainty in Far-Field and Compact Range

김용길 · 최종욱 · 장보영 · 김지수 · 김종규

Yong-Gil Kim · Jong-uk Choi · Bo-Young Jang · Ji-Su Kim · Jong-Kyu Kim

요 약

본 논문은 안테나 이득 측정에 사용되는 원전계(far-field) 방식과 컴팩트 레인지(CATR, compact antenna test range) 방식의 측정 불확도를 동일한 기준에서 정량적으로 비교·분석한다. 안테나 이득은 국방 및 항공·우주 분야에서 시스템 성능을 좌우하는 핵심 지표로, 신뢰성 확보를 위해 체계적인 불확도 평가가 요구된다. 본 연구에서는 JCGM 100:2008(GUM)과 IEEE Std 149TM-2021을 기반으로, 원전계 이득 측정 불확도 평가 연구와 CATR 환경을 고려한 불확도 평가 프레임워크를 비교 대상으로 설정하였다. 분석 결과, 원전계 측정은 지면 반사, 다중경로 및 환경 안정성과 같은 외부 환경 요인이 지배적인 불확도 원인으로 작용하여 확장 불확도가 약 0.60 dB로 평가되었다. 반면, 컴팩트 레인지는 실내 환경에서 다중경로 영향을 구조적으로 억제할 수 있으나, quiet zone 진폭 균일도, 피드 및 반사체 정렬 정밀도, 임피던스 불일치와 같은 시스템 고유 요인이 주요 불확도 항목으로 작용하여 확장 불확도는 약 0.64 dB로 나타났다. 또한 두 측정 방식의 구조적·운용적 특성을 비교하여, 안테나 특성, 주파수 대역, 요구 정밀도 및 시험 목적에 따른 측정 방식 선택 가이드라인을 제시하였다.

Abstract

This paper presents a quantitative comparison of the antenna gain measurement uncertainty between far-field antenna test ranges and compact antenna test ranges (CATR) using a unified evaluation framework. Antenna gain is a critical performance metric in defense and aerospace systems, requiring systematic uncertainty assessment to ensure measurement reliability. Based on the JCGM 100:2008 (GUM) and IEEE Std 149TM-2021, this study compares a far-field gain uncertainty assessment and CATR-oriented uncertainty evaluation framework. The results show that far-field measurements were primarily affected by environmental factors, such as ground reflections, multipath propagation, and environmental stability, yielding an expanded uncertainty of approximately 0.60 dB. By contrast, CATR measurements effectively suppressed environmental multipath effects under controlled indoor conditions. However, system-dependent factors such as quiet-zone amplitude uniformity, feed and reflector alignment accuracy, and impedance mismatch dominate, resulting in the expanded uncertainty of approximately 0.64 dB. The structural and operational characteristics of both measurement systems are compared, and practical guidelines for selecting an appropriate measurement approach are provided according to antenna characteristics, frequency range, required accuracy, and test objectives.

Key words: Antenna Gain, Measurement Uncertainty, Far-Field, Compact Range

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received March 10, 2026 ; Revised April 3, 2026 ; Accepted May 11, 2026. (ID No. 20260310-015)

· Corresponding Author: YongGil Kim (e-mail: dong1230@add.re.kr)

I. 서 론

안테나 이득(antenna gain)은 안테나의 성능을 평가하는 가장 기본적이면서도 핵심적인 지표로, 정밀하고 신뢰성 있는 측정이 요구된다. 특히 국방 및 항공·우주 분야에서는 안테나 성능이 시스템 운용 성능과 직결되므로, 정량적이고 표준화된 안테나 이득 측정 절차의 확보가 필수적이다. 그러나 실제 측정 환경에서는 송수신 정렬 오차, 편파 불일치, 다중경로 반사, 환경 변화 등 다양한 요인이 측정 결과에 영향을 미치며, 이로 인해 측정값과 실제값 사이에는 불가피한 오차가 발생한다. 이러한 오차를 체계적으로 관리하고 측정 결과의 신뢰도를 확보하기 위해서는 측정 불확도(measurement uncertainty)에 대한 정량적 평가가 필요하다.

측정 불확도에 대한 국제적 기준은 JCGM 100:2008 (GUM, guide to the expression of uncertainty in measurement)에서 제시되고 있으며, 안테나 측정 분야에서는 IEEE Std 149™-2021이 대표적인 표준으로 활용되고 있다. 이러한 표준에 따라, 안테나 이득 측정에서는 측정에 영향을 미치는 다양한 요인을 식별하고, 각 항목의 불확도를 정량적으로 산출한 후 RSS(root sum square) 방법을 통해 전체 확장 불확도를 평가한다. 최근에는 이러한 절차를 기반으로 원전계(far-field) 측정 환경에서의 안테나 이득 불확도 평가에 관한 연구가 활발히 수행되어 왔다.

기존 원전계 이득 측정 연구에서는 시험 대상 안테나(AUT, antenna under test)와 표준 안테나 간의 이득 전달(gain-transfer) 방식을 적용하여, 송수신 정렬 오차, 편파 순도, 다중경로 반사, 환경 안정성 등 다양한 불확도 항목을 정의하고 이들의 기여도를 분석하였다. 이러한 연구들은 시험평가 절차의 표준화와 측정 결과의 신뢰성 향상에 기여해 왔으나, 실외 환경에 의존하는 원전계 측정 특성상 기상 변화 및 주변 반사 환경에 따른 불확도 증가는 구조적 한계를 지닌다.

한편, 이러한 한계를 극복하기 위한 대안으로 실내 환경에서 정밀 측정을 수행할 수 있는 컴팩트 레인지(CATR, compact antenna test range) 시스템의 활용이 증가하고 있다. 컴팩트 레인지는 반사체를 이용하여 제한된 실내 공간에 평면파 영역(quiet zone)을 형성함으로써, 실외 원전계와 유사한 조건에서 측정을 수행할 수 있는 장점을 가진

다. 이로 인해 외부 환경 요인의 영향을 최소화하고 다중경로 반사를 효과적으로 억제할 수 있으나, 반사체 형상 정밀도, 피드 정렬 오차, quiet zone 품질과 같은 시스템 고유 요인이 새로운 불확도 원인으로 작용할 수 있다.

그럼에도 불구하고, 현재까지 원전계와 컴팩트 레인지 측정 방식 간의 불확도 항목과 기여도를 동일한 기준에서 정량적으로 비교·분석한 연구는 제한적인 실정이다. 특히 두 측정 방식의 불확도 특성이 어떠한 물리적 요인에 의해 지배되는지에 대한 체계적인 비교는 충분히 이루어지지 않았다. 이에 본 논문에서는 GUM 및 IEEE Std 149™-2021을 기반으로, 원전계 이득 측정 불확도 평가 연구와 컴팩트 레인지 환경을 고려한 불확도 평가 프레임워크를 동일한 기준에서 비교·분석하고자 한다. 이를 통해 두 측정 방식의 불확도 특성 차이를 정량적으로 제시하고, 측정 대상 안테나 특성과 시험 조건에 따른 측정 방식 선택을 위한 실무적 가이드라인을 제안한다(표 1).

두 논문 모두 JCGM 100:2008(GUM)의 불확도 계산 절차를 기반으로 하며, 확장 불확도는 RSS(root sum square)로 산출한다.

기존 연구에서는 원전계 또는 컴팩트 레인지 각각에 대한 불확도 분석이 개별적으로 수행되어왔으나, 동일한 평가 기준에서 두 측정 방식의 불확도 항목을 직접 대응시키고 정량적으로 비교하는 연구는 제한적이다.

본 연구는 GUM 및 IEEE Std 149™-2021 기반의 통합 불확도 평가 프레임워크를 적용하여 far-field와 CATR의 불확도 항목을 1:1 매핑하고, 지배적 오차 메커니즘을 비교 분석하였다는 점에서 기존 연구와 차별성을 갖는다.

또한, 단순 수치 비교를 넘어 불확도 지배 요인의 구조적 차이를 규명하고, 이를 기반으로 측정 방식 선택을 위한 실무적 가이드라인을 제시한다는 점에서 학술적·실용적 기여를 갖는다.

특히 본 연구는 두 측정 방식의 확장 불확도가 유사한 수준임에도 불구하고, 지배적 불확도 항목이 환경 요인

표 1. 비교 연구 참고 문헌

Table 1. References for comparative analysis.

Category	Reference
Paper A far-field measurement	[3]
Paper B compact range measurement	[4]

중심(far-field)과 시스템 구조 요인 중심(CATR)으로 근본적으로 다르다는 점을 정량적으로 규명하였다. 이는 기존 연구에서 명확히 제시되지 않았던 비교 결과로서 본 연구의 주요 기여이다.

II. 불확도 항목 정의 및 결과 비교

모든 측정에는 측정값과 실제값 사이에 불가피한 차이가 존재하며, 이러한 차이를 정량적으로 표현하기 위해 측정 불확도(measurement uncertainty) 개념이 적용된다. 측정 불확도는 GUM(JCGM 100:2008) 참고문헌 [1]에서 정의한 절차에 따라, 측정에 영향을 미치는 모든 요인을 식별하고, 이를 각각 정량적으로 추정 후 RSS(root sum square) 방식으로 결합하여 전체 합성 불확도를 산출한다. 안테나 측정 분야에서는 IEEE Std 149™-2021 참고문헌 [2]를 기반으로 각 항목을 정의하며, 일반적으로 유형 A(type A)와 유형 B(type B) 불확도로 구분한다.

- Type A: 반복 측정 데이터를 통계적으로 분석하여 평가(예: 정렬 반복, 연결 재현성, 다중경로 반사 실험 등)
- Type B: 기기 명세서, 교정 성적서, 이론 분석, 환경 제원 등 비통계적 방법으로 평가(예: 표준 안테나 교정 오차, 임피던스 불일치 등)

각 불확도 항목의 표준 불확도 u_i 는 서로 독립적이며 정규분포를 따른다고 가정하고, 전체 합성 표준 불확도는 u_c 를 식 (1)과 같이 RSS 방식으로 계산하였다.

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=0}^n u_i^2} \quad (1)$$

확장 불확도는 약 95 %의 신뢰수준을 확보하기 위하여 커버리지 계수 $k=2$ 를 적용하여 식 (2)와 같이 산출하였다.

$$U = k \times u_c \quad (2)$$

표 2는 기존 원전계(far-field) 안테나 이득 측정 불확도 평가 연구에서 정의된 불확도 항목을 정리한 것이다. 각 항목은 IEEE Std 149™-2021에 근거하여 측정 환경과 시스템 구성 요소를 고려해 정의되었으며, 발생 원인에 따라 type A 및 type B 불확도로 구분하였다. 본 연구에서는 원전계 측정 환경에서 일반적으로 고려되는 15개 불확도 항목을 대상으로 하여, 각 항목의 물리적 발생 원인과 평

표 2. Far-field 불확도 항목별 설명

Table 2. Changes in far-field uncertainty components.

No.	Uncertainty item	Evaluation type	Cause/mechanism
1	Source polarization purity	B	Source polarization purity, positioner accuracy
2	AUT alignment	A/B	Receiving antenna alignment accuracy
3	Gain standard uncertainty	B	Standard horn antenna calibration certificate
4	Repeatability	A	Measurement repeatability
5	Mutual coupling-SGH	B	Transmit-receive antenna mutual coupling
6	Multipath reflections-SGH	A	Transmitting sides reflection (ground and structures)
7	Leakage-SGH	A	Cable/facility leakage
8	Impedance mismatch	B	Reflection coefficient, instrument specifications
9	Receiver amplitude linearity	B	Receiver nonlinearity
10	Receiver dynamic range	A	Receiver dynamic range
11	Phase error	B	Phase measurement error
12	Mutual coupling-AUT	B	Interference factors around the AUT
13	Multipath reflections-AUT	A	Receiving-side reflection
14	Leakage-AUT	A	Receiver cable leakage
15	Environmental stability	A	Environmental conditions (temperature, humidity, wind speed, etc.)

가 유형을 명확히 제시함으로써 이후 컴팩트 레인지 환경과의 비교를 위한 기준 프레임워크로 활용한다.

표 3은 컴팩트 레인지(CATR, compact antenna test range) 환경에서 적용되는 불확도 항목을 정리한 것이다. 컴팩트 레인지는 실내 환경에서 quiet zone을 형성하여 측정을 수행하므로, 원전계 환경과는 불확도의 발생 메커니

표 3. Compact range 불확도 항목별 설명

Table 3. Changes in compact range uncertainty components.

No.	Uncertainty item	Evaluation type	Cause/mechanism
1	Range antenna alignment	B	phase center - focus misalignment, reflector geometry
2	Polarization mismatch	B	Polarization mismatch, depolarization
3	Range antenna quiet zone coupling	B	Quiet zone direction stray signal
4	Reflector edge diffraction	B	Edge diffraction, surface roughness
5	Reflector surface roughness	B	Surface roughness
6	Leakage and cross-talk	A	Cable/facility, internal cross-talk
7	Room scattering	B	Wall/ceiling/floor reflections
8	Quiet zone amplitude taper	A	Range feed pattern projection
9	Mismatch	B	Transmission line, reflection coefficient
10	AUT positioning system	B	Position error (cross-pol measurment sensitivity)
11	Receiver non-linearity	B	Receiver dynamic range
12	Receiver dynamic range	A	Noise effects in low-signal measurement
13	RF repeatability	A	Cable reconnection and temperature variation
14	Multiple reflections	A/B	AUT → reflector → AUT feedback
15	Gain standard	B	Standard horn antenna calibration certificate
16	Other sources	B	Remaining unmodeled components

즘이 다를 수 있다. 이에 따라 표 2에서는 반사체 형상 정밀도, 피드 및 안테나 정렬 오차, quiet zone 진폭 균일도와 같이 CATR 고유의 시스템 특성을 반영한 불확도 항

목을 포함하였다.

각 항목은 GUM 및 IEEE Std 149TM-2021 절차에 따라 평가 유형을 구분하였으며, 이후 원전계 불확도 항목과의 대응 관계 분석을 위한 비교 기준으로 사용한다.

표 4는 원전계(far-field) 측정 환경과 컴팩트 레인지(CATR, compact antenna test range) 환경에서 정의된 불확도 항목 간의 대응 관계를 정리한 것이다. 두 측정 방식은 동일한 GUM(JCGM 100:2008) 기반의 불확도 계산 절차를 따르지만, 측정 환경과 시스템 구조의 차이로 인해 개별 불확도 항목의 물리적 발생 원인과 기여도가 상이하게 나타난다. 이에 본 연구에서는 불확도 항목의 명칭 자체보다는, 각 항목이 대표하는 물리적 오차 메커니즘을 기준으로 대응 관계를 설정하였다.

원전계 측정에서 지배적인 불확도 항목인 지면 및 주변 구조물에 의한 다중경로 반사(multipath reflection)는 컴팩트 레인지 환경에서는 흡수체와 quiet zone 형성에 의해 구조적으로 억제되므로, 표 3에서는 해당 항목을 직접적으로 대응시키지 않았다. 반면, 원전계 측정에서의 편파 순도(source polarization purity)는 컴팩트 레인지 환경에서는 송신 피드의 편파 특성뿐만 아니라 반사체 곡면에 의한 교차 편파 성분이 추가로 발생할 수 있으므로, 피드 편파 특성과 반사체 관련 항목으로 대응시켰다. 또한 임피던스 불일치, 표준 안테나 이득 불확도와 같이 측정 환경과 무관하게 공통적으로 적용되는 항목은 두 방식 간에 1:1 대응 관계로 설정하였다.

이와 같은 대응 관계 정리는 두 측정 방식의 불확도 항목을 동일한 기준에서 비교·분석하기 위한 개념적 매핑 과정으로, 이후 표 5 및 표 6에 제시된 정량적 불확도 결과 해석의 근거를 제공한다.

표 5 및 표 6의 불확도 값은 각각 기존 원전계 측정 불확도 평가 연구 참고문헌 [3]과 컴팩트 레인지 불확도 분석 보고서 참고문헌 [4]에서 실제 측정된 값으로, 동일한 평가 기준(GUM, IEEE Std 149TM-2021)에 따라 정규화하여 비교에 활용하였다.

표 5 및 표 6은 각각 원전계(far-field) 측정 환경과 컴팩트 레인지(CATR, compact antenna test range) 환경에서 산출된 불확도 항목별 표준 불확도와 신뢰수준 95 %에서의 확장 불확도 결과를 제시한다. 두 측정 방식 모두

표 4. Far-field와 compact range 불확도 대응 항목 비교

Table 4. Comparison of uncertainty components between far-field and compact range.

FF item (15)	CATR corresponding items (16)	Characteristics	Analysis
Gain Standard uncertainty	Gain standard	Common	-
Impedance mismatch	mismatch	Common	-
Source polarization purity	Feed polarization+ reflector cross-pol	Increased feed influence in CATR	In the CATR system, polarization distortion can occur not only due to the source (feed) but also because of the curved surface of the reflector.
Multipath reflection	Removal (absorber, QZ)	FF intrinsic error	The far-field range is highly affected by reflections from the ground and surrounding environment.
None	Reflector surface accuracy	CATR intrinsic error	The level of multipath reflection depends on how smooth the reflector surface is.

표 5. Far-field 불확도 항목별 결과

Table 5. Far-field uncertainty component results.

No.	Uncertainty item	Far-field uncertainty
1	Source polarization purity	0.161
2	AUT alignment	0.001
3	Gain standard uncertainty	0.165
4	Repeatability	0.058
5	Mutual coupling-SGH	0.000
6	Multipath reflections-SGH	0.080
7	Leakage-SGH	0.002
8	Impedance mismatch	0.157
9	Receiver amplitude linearity	0.000
10	Receiver dynamic range	0.000
11	Phase error	0.000
12	Mutual coupling-AUT	0.000
13	Multipath reflections-AUT	0.033
14	Leakage-AUT	0.000
15	Environmental stability	0.032
Combined uncertainty URSS (1q)		0.299
Expanded uncertainty URSS (2q)		0.599

GUM(JCGM 100:2008)에 따라 각 불확도 항목을 RSS(root sum square) 방법으로 결합하여 합성 불확도 및 확장 불확도를 산출하였다.

원전계 측정 결과(표 5)를 보면, 지면 및 주변 구조물에

표 6. Compact range 불확도 항목별 결과

Table 6. Compact range uncertainty component results.

No.	Uncertainty item	Compact range uncertainty
1	Range antenna alignment	0.000
2	Polarization mismatch	0.009
3	Range antenna quiet zone coupling	0.004
4	Reflector edge diffraction	0.080
5	Reflector surface roughness	0.000
6	Leakage and cross-talk	0.000
7	Room scattering	0.000
8	Quiet zone amplitude taper	0.018
9	Mismatch	0.247
10	AUT positioning system	0.000
11	Receiver non-linearity	0.000
12	Receiver dynamic range	0.000
13	RF repeatability	0.022
14	Multiple reflections	0.000
15	Gain standard	0.185
16	Other sources	0.000
Combined uncertainty URSS (1q)		0.320
Expanded uncertainty URSS (2q)		0.640

의한 다중경로 반사와 환경 안정성 관련 항목이 주요 불확도 기여 요인으로 나타났으며, 표준 안테나 이득 불확도와 임피던스 불일치 역시 상대적으로 큰 기여도를 보

였다. 이러한 외부 환경 요인의 영향으로 원전계 측정의 확장 불확도는 약 0.599 dB로 평가되었다. 이는 실외 측정 환경에서 환경 변화와 반사 조건이 측정 정확도에 중요한 영향을 미침을 보여준다.

반면, 컴팩트 레인지 측정 결과(표 6)에서는 외부 환경 요인의 영향이 크게 감소한 대신, quiet zone의 진폭 균일도, 반사체 및 피드 정렬 정밀도, 임피던스 불일치와 같은 시스템 고유 요인이 주요 불확도 항목으로 작용하였다. 특히 임피던스 불일치와 표준 안테나 이득 불확도가 전체 불확도에서 지배적인 기여를 보였으며, 이에 따라 확장 불확도는 약 0.640 dB로 산출되었다.

두 측정 방식의 확장 불확도 수준은 유사한 값을 보이지만, 불확도를 지배하는 항목의 구성과 물리적 원인은 근본적으로 상이하다. 원전계 측정은 환경 요인에 민감한 반면, 컴팩트 레인지는 정렬 정확도와 quiet zone 품질 관리가 측정 정확도를 결정하는 핵심 요소임을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 측정 환경에 따라 관리해야 할 주요 불확도 항목이 달라짐을 정량적으로 보여주며, 측정 목적과 조건에 따른 시험 방식 선택의 중요성을 시사한다.

각 불확도 항목의 기여도를 정량적으로 분석하기 위해, 전체 합성 불확도 대비 각 항목의 기여도는 분산 기반의 제곱 비율을 다음과 같이 정의하였다.

$$Contribution_i(\%) = \frac{u_i^2}{\sum u_i^2} \quad (3)$$

표 7 및 표 8은 far-field와 compact range 측정 환경에서 불확도 항목별 기여도를 정량적으로 비교한 결과를 나타낸다. 기여도는 각 항목의 분산 비율을 기준으로 산출되었다.

Far-field 측정에서는 gain standard, source polarization purity, impedance mismatch, multipath reflections 항목이 전체 불확도의 대부분을 차지하며, 특히 방사 조건 및 환경과 관련된 항목이 지배적인 영향을 미치는 것으로 나타났다.

반면, compact range에서는 impedance mismatch와 Gain Standard가 전체 불확도의 약 65 % 이상을 차지하며, 시스템 내부 정합 특성이 불확도를 지배하는 구조를 보인다.

이러한 결과는 두 측정 방식이 유사한 수준의 확장 불확도를 가지더라도, 불확도를 결정하는 물리적 요인이 본질적으로 다름을 정량적으로 보여준다.

표 7. Far-field 불확도 항목별 기여도 결과

Table 7. Far-field uncertainty component contribution results.

No.	Uncertainty item	Standard uncertainty (u_i)	Contribution (%)	Remarks
1	Gain standard uncertainty	0.165	30.4	Dominant component
2	Source polarization purity	0.161	28.9	Dominant component
3	Impedance mismatch	0.157	27.5	Major components
4	Multipath reflections (SGH+AUT)	0.113	14.3	Environmental effects
5	Environmental stability	0.032	1.1	Auxiliary components
6	Other components	-	<1	Negligible
Total			100 %	

표 8. Compact range 불확도 항목별 기여도 결과

Table 8. Compact range uncertainty component contribution results.

No.	Uncertainty item	Standard uncertainty (u_i)	Contribution (%)	Remarks
1	Impedance mismatch	0.247	37.6	Largest dominance
2	Gain standard	0.185	28.8	Dominant component
3	Reflector edge diffraction	0.080	9.8	Structural effects
4	Quiet zone amplitude taper	0.018	1.0	QZ effect
5	RF repeatability	0.022	1.5	Measurement stability
6	Other components	-	<1	Negligible
Total			100 %	

Ⅲ. 시스템 비교 및 선택 가이드라인 제시

앞선 장에서는 원전계(far-field) 측정 방식과 컴팩트 레인지(CATR, compact antenna test range) 측정 방식에 대해 동일한 불확도 평가 기준에서 항목별 특성과 기여도를 정량적으로 비교하였다. 그 결과, 두 측정 방식은 유사한 수준의 확장 불확도를 확보할 수 있으나, 불확도를 지배하는 요인과 관리 대상 항목은 측정 환경과 시스템 구조에 따라 본질적으로 상이함을 확인하였다. 이는 측정 정확도 향상을 위해 단일 측정 방식의 우수성을 논하기보다는, 측정 목적과 시험 조건에 따라 적절한 방식을 선택하는 것이 중요함을 의미한다.

본 장에서는 이러한 정량적 분석 결과를 바탕으로, 원전계와 컴팩트 레인지 측정 시스템의 구조적 특성과 운용상의 장단점을 비교한다. 특히 환경 영향, 다중경로 억제 능력, 정렬 민감도, 주파수 의존성, 운용 비용 및 구축 조건 등 실무 시험 환경에서 중요한 요소를 중심으로 두 측정 방식을 체계적으로 분석한다. 이를 통해 안테나 크기, 주파수 대역, 요구 정밀도 및 시험 목적에 따라 적합한 측정 방식을 선택할 수 있는 실질적인 가이드라인을 제시하고자 한다.

표 9는 원전계(far-field) 측정 방식과 컴팩트 레인지(CATR, compact antenna test range) 측정 방식의 구조적·운용적 장단점을 비교하여 정리한 것이다. 원전계 측정 방식은 실외 환경에서 실제 운용 조건을 반영할 수 있다는 장점이 있으나, 지면 반사와 주변 구조물에 의한 다중경로 영향, 기상 변화에 따른 환경 불안정성으로 인해 측정 결과의 반복성과 안정성이 저하될 수 있다. 반면, 컴팩트 레인지는 실내 환경에서 측정을 수행함으로써 외부 환경 요인의 영향을 최소화하고, 다중경로 반사를 효과적으로 억제할 수 있어 반복성이 우수한 측정이 가능하다. 그러나 반사체 및 피드 정렬 정밀도에 대한 요구가 높고, 초기 구축 비용과 공간 제약이 크다는 단점이 존재한다. 이러한 비교 결과는 두 측정 방식이 서로 다른 장점을 지니며, 적용 목적에 따라 선택되어야 함을 시사한다.

표 10은 측정 대상 안테나의 특성과 시험 목적에 따라 원전계 및 컴팩트 레인지 측정 방식을 선택하기 위한 가이드

표 9. Far-field와 compact range 장단점

Table 9. Comparison of advantages and disadvantages between far-field and compact range.

	Far-field advantage and disadvantages	Compact range advantage and disadvantages
Advantages	Capable of reflecting real operational environments	Multipath removal, excellent repeatability
Disadvantages	Multipath highly sensitive to environmental effects	High alignment sensitivity and installation cost

드라인을 제시한다. 고주파수 대역에서 높은 지향성을 갖는 안테나의 정밀 이득 측정이나 장기간 반복 시험이 요구되는 경우에는, 환경 제어와 반복성이 우수한 컴팩트 레인지 측정 방식이 적합하다. 반면, 대형 안테나 또는 저주파수 대역 안테나의 측정과 같이 실외 운용 환경을 반영할 필요가 있거나, 초기 구축 비용과 공간 제약이 중요한 경우에는 원전계 측정 방식이 현실적인 대안이 될 수 있다. 또한, 시험 목적이 절대적인 최대 정밀도 확보인지, 또는 운용 환경 반영인지에 따라 측정 방식 선택 기준이 달라질 수 있음을 고려해야 한다. 이러한 가이드라인은 단일 측정 방식의 우수성을 판단하기보다는, 시험 조건에 따른 합리적인 선택을 지원하기 위한 기준으로 활용될 수 있다.

본 장에서는 앞선 불확도 정량 분석 결과를 바탕으로, 원전계와 컴팩트 레인지 측정 방식의 시스템적 특성과 운용상의 장단점을 비교하고, 실제 시험 환경에서의 측정 방식 선택을 위한 가이드라인을 제시하였다. 분석 결과, 원전계 측정 방식은 실외 운용 환경을 반영할 수 있다는 장점이 있는 반면 환경 변화와 다중경로에 민감하며, 컴팩트 레인지 측정 방식은 높은 반복성과 안정성을 제공하지만 정렬 정밀도와 구축 비용에 대한 부담이 존재한다. 이는 두 측정 방식이 경쟁 관계가 아닌 상호 보완적 관계에 있음을 의미하며, 측정 대상 안테나의 특성, 주파수 대역, 요구 정밀도 및 시험 목적에 따라 적절한 방식이 선택되어야 함을 시사한다. 본 장에서 제시한 비교 결과와 선택 가이드라인은 안테나 시험 환경 설계 및 측정 전략 수립 시 실무적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

표 10. Far-field와 compact range 측정 방식 비교 및 선택 가이드라인

Table 10. Comparative analysis of far-field and compact range measurement methods and selection guidelines.

Category	Far-field	Compact range
Environmental effects	Highly affected by external environmental conditions, weather-related variables exist	Stable due to indoor environmental control
Reflection suppression	Ground and structural reflections are present	Excellent suppression using absorbers
Frequency dependence	Frequency-dependent variations exist	Stable frequency response
Alignment accuracy	Large positioner, alignment errors are present	Supports precise three-axis alignment, feed alignment is important
Dominant uncertainty component	Environment-multipath, standard horn	Standard horn, alignment accuracy, quiet zone characteristics
Operation and installation costs	Low cost, requires a large test site	High cost, requires a large indoor space
Application suitability	Large outdoor antenna, low-frequency measurement	High frequency, high-precision measurement, beam scanning, antenna array

IV. 결 론

본 논문에서는 안테나 이득 측정에 사용되는 원전계(far-field) 방식과 컴팩트 레인지(CATR, compact antenna test range) 방식의 측정 불확도를 GUM(JCGM 100:2008)과 IEEE Std 149™-2021을 기반으로 정량적으로 비교·분석하였다. 두 측정 방식 모두 RSS(root sum square) 방법을 적용하여 확장 불확도를 산출하였으며, 동일한 이득 전달(gain-transfer) 개념을 기준으로 불확도 항목과 기여도를 비교하였다.

분석 결과, 원전계 측정은 지면 반사, 다중경로 및 환경 변화와 같은 외부 요인이 지배적인 불확도 원인으로 작용

하여 확장 불확도가 약 0.60 dB로 평가되었다. 반면, 컴팩트 레인지는 실내 환경에서 다중경로 영향을 구조적으로 억제할 수 있으나, quiet zone의 진폭 균일도, 피드 및 반사체 정렬 정밀도, 임피던스 불일치와 같은 시스템 고유 요인이 주요 불확도 항목으로 작용하여 확장 불확도는 약 0.64 dB로 나타났다. 이는 두 측정 방식이 유사한 수준의 측정 정확도를 확보할 수 있으나, 불확도를 지배하는 물리적 원인과 관리 항목이 본질적으로 다름을 의미한다.

본 연구의 주요 기여는 원전계와 컴팩트 레인지 측정 방식을 동일한 불확도 평가 기준에서 비교함으로써, 두 방식이 단순한 대체 관계가 아닌 상호 보완적 관계임을 정량적으로 제시한 데 있다. 또한, 측정 대상 안테나의 크기, 주파수 대역, 요구 정밀도 및 시험 환경 조건에 따라 적절한 측정 방식을 선택할 수 있는 실무적 가이드라인을 제안하였다.

한편, 본 연구는 기존 문헌에 기반한 비교 분석을 중심으로 수행되었으며, 특정 안테나 형상과 주파수 대역에 한정된 결과라는 한계를 가진다. 향후 연구에서는 다양한 안테나 형상과 주파수 대역에 대한 실험적 검증을 확대하고, 컴팩트 레인지 환경에서 quiet zone 균일도, 반사체 형상 정밀도, 정렬 오차와 같은 핵심 불확도 항목에 대한 표준화된 평가 절차를 정립할 필요가 있다. 이러한 후속 연구는 안테나 시험 환경 설계 및 불확도 평가의 신뢰성 향상에 기여할 것으로 기대된다.

References

- [1] Joint Committee for Guides in Metrology, "Evaluation of measurement data: Guide to the expression of uncertainty in measurement," JCGM 100:2008, GUM 1995 with minor corrections, Sep. 2008, corrected version 2010.
- [2] IEEE Std 149™-2021, *IEEE Recommended Practice for Antenna Measurements*, IEEE, 2021.
- [3] T. Han, T. Shin, and Y. Kim, "Uncertainty assessment for gain measurement at a far-field antenna test range," in *Korea Institute of Military Science and Technology (KIMST) Annual Conference Proceedings*, Daejeon, KIMST, 2022, pp. 769-770.
- [4] S. Blalock, J. A. Fordham, "Antenna measurement uncertainty method for measurements in compact antenna test ranges," Suwanee, GA, MI Technologies, 2016.

김 용 길 [국방과학연구소/선임기술기사]

<https://orcid.org/0009-0001-1317-2579>



2017년 2월: 한밭대학교 컴퓨터공학과 (공학사)
2014년 10월~현재: 국방과학연구소 선임 기술기사
[주 관심분야] RF, Antenna, EMC 등

김 지 수 [국방과학연구소/선임기술원]

<https://orcid.org/0009-0005-7721-5995>



2012년 2월: 호서대학교 정보통신공학과 (공학사)
2018년 2월: 충남대학교 산업공학과 (공학석사)
2012년 4월~현재: 국방과학연구소 선임 기술원
[주 관심분야] 시험평가, 시험시스템 등

최 중 욱 [국방과학연구소/선임기술원]

<https://orcid.org/0009-0008-0618-4687>



2016년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
2021년 12월~현재: 국방과학연구소 선임 기술원
[주 관심분야] RF, GNSS, Jamming

김 중 규 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0009-0007-8513-7426>



2004년 8월: 고려대학교 전기전자전파공학부 (공학사)
2006년 8월: 고려대학교 전파통신공학과 (공학석사)
2015년 2월: 고려대학교 전기전자공학과 (공학박사 수료)
2007년 2월~현재: 국방과학연구소 책임 연구원
[주 관심분야] 정보통신, 신호처리 등

장 보 영 [국방과학연구소/선임기술원]

<https://orcid.org/0009-0009-7878-2245>



2006년 2월: 중부대학교 인쇄정보미디어 학과 (공학사)
2017년 2월~현재: 국방과학연구소 선임 기술원
[주 관심분야] RF, Antenna, EMC 등