

## 밀리미터파 근거리장 측정 및 불확도 분석

# Uncertainty Analysis and Fitting of Near-Field Measurements for Millimeter Waves

박정규 · 최솔 · 조경룡\*

Jungkuy Park · Sol Choi · Kyungr Yong Cho\*

### 요약

자유공간에서 전파의 손실은 자유공간의 원거리장에서 성립하는 프리이스(Friis) 공식에 따라 송신안테나로부터 거리의 역제곱에 비례한다. 그러나 그 공식은 원거리장에서만 성립한다고 알려졌다. 근거리장인 리액티브 영역 및 프레즈넬 영역을 포함하여 원거리장에서 밀리미터파 대역인 20 GHz에서 90 GHz까지 송수신 안테나 사이의 삽입손실을 측정하였는데 안테나의 이격 거리를 최대 1.4 m로 1 mm씩 늘려가면서 데이터를 수집하였다. 그 데이터를 자유공간 전송 손실인  $(\lambda/4 \pi r)^2$  비교하였으며 근거리장에서의 실험값 및 이론값의 불일치를 확인하였다. 이러한 불일치를 해결하기 위하여 근거리에서는 안테나 이득이 거리에 의존한다는 것을 가정하여 자유공간 전송 손실에 추가하는 공식을 제안하였다. 본 논문에서는 추가로 100 GHz를 측정하고 그 공식에 맞추어 이론값과 실험값을 피팅하였으며 근거리장의 프레즈넬 영역을 포함하여 리액티브 영역 약 50% 일부까지 측정 데이터와 잘 일치하는 것을 보였다. 측정 결과에 대한 불확도 분석으로서 안테나 시험장 환경에서 반사파의 영향에 의한 오차를 추정 분석하였고 측정 데이터와 새로운 공식을 피팅하는 과정에서 발생될 것이라 추정하는 오차 요인을 최소자승법에 따라 해석하여 전체 불확도를 산출하였다.

### Abstract

Theoretical radio frequency attenuation in free space is characterized by the Friis equation in the far-field range. This equation states that free-space propagation of electromagnetic waves is inversely proportional to the square of their distance from the source. However, this holds true only in the far-field range. Accordingly, we investigate the propagation characteristics of millimeter waves in all field ranges. The study provides measurement results of free-space insertion loss from 20 to 90 GHz frequency ranges, where the separations between the transmitting and receiving antennas are increased from 1 to 1400 mm in 1-mm increments. The measurement distances cover all ranges, including the reactive and Fresnel ranges of the near field as well as far-field ranges. The measuring values are fitted in the free-space path loss factor  $(\lambda/4 \pi r)^2$ . Discrepancies exist between the theoretical and measured values in the near-field ranges. We add terms to the formula to resolve the differences in the near field. The calculated results derived from the new formula are shown to be in good agreement in the Fresnel range and in some parts of the 50% reactive range. This study yields the same results at 100-GHz measurements and provides an uncertainty analysis of insertion loss measurements for near and far fields in millimeter-wave ranges. These include the effects of the measurement site and errors in fitting the measurement data to a correction formula. The fitting uncertainty is evaluated using the least squares method.

Key words: Millimeter Wave, Near Field, Friis Equation, Free Space Path Loss, Uncertainty Analysis

국립전파연구원 전파시험인증센터(National Radio Research Agency, CCAC)

\*순천대학교 공과대학 인공지능공학부(Department of AI Engineering College of Engineering Suncheon National University)

· Manuscript received December 11, 2023 ; Revised December 30, 2023 ; Accepted February 27, 2024. (ID No. 20231211-105)

· Corresponding Author: Kyungr Yong Cho (e-mail: jkl@snu.ac.kr)

## I. 서 론

정보통신기술이 발전할수록 주파수 사용 대역이 높아지고 전파의 근거리장 이용이 증대할 것으로 예상된다. 전파는 일반적으로 근거리 측정 결과를 직접 이용하지 못하고 원거리로 변환하는 기술을 이용하고 있다. 전송에 있어서 금과옥조와 같은 프리이스(Friis) 방정식<sup>[1]</sup>은 원거리에서 성립한다. 전파의 측정과 이용은 안테나가 필연적인 도구인데 프리이스 방정식에는 안테나 이득의 항이 반드시 포함되어 자유공간 전파 손실을 정의한다. 프리이스 방정식에 포함된 안테나 이득은 원거리에서 성립하며 해당 안테나의 고유의 성질로 여겨져 거리에 따라 변화하지 않는다는 가정이 깔려있다.

혼안테나에 대해 20 GHz 및 30 GHz의 근거리(리액티브와 프레즈넬) 및 원거리 영역에서 전파의 전송 손실을 측정하고 그 데이터를 피팅하면서 거리의 역제곱 법칙이 성립하는 원거리의 자유공간 전파전달 공식에 추가 항을 삽입하여 근거리(20 GHz 기준으로 리액티브 전체 영역 중 송신 안테나로부터 약 50 % 영역은 제외하고) 및 원거리영역에서도 만족하는 새로운 공식을 경험적으로 찾아내었다<sup>[2]</sup>. 후속작업으로서 주파수를 상향하여 40~90 GHz에서도 측정된 데이터가 새로 도입한 공식에 잘 피팅된다는 사실을 보였으며 그에 따라서 거리에 의존하는 안테나 이득 공식도 추정하였다<sup>[3]</sup>.

본 논문은 100 GHz를 추가로 측정하여 그 결과가 위의 참고문헌에서 제안한 새로운 전송 공식<sup>[2],[3]</sup>과 잘 피팅된다는 것을 확인한 후, 20~100 GHz 대역의 혼안테나들 사이의 삽입손실을 측정할 때, 그 공식에 따라 피팅을 수행하는 과정에서 발생하는 오차 요인을 내삽법으로서 최소자승법을 적용하였다<sup>[6]</sup>. 그렇게 분석한 오차 요인을 반영하여 새로운 공식에 따른 피팅에 잘 들어맞는 영역에서 리액티브 영역의 약 50 %를 포함한 근거리 및 원거리영역의 전파 전송손실 측정 시에 전체 불확도를 추정하고 산출함으로써 측정결과의 신뢰도를 확인하였다.

## II. 역제곱 공식과 근거리 측정 결과

전자기파가 자유공간을 통해 전달될 때 원거리 장에서 프리이스 공식에 따라 송신원으로부터 거리  $r$ 의 역제곱

에 비례한다는 것은 잘 알려진 사실이다<sup>[1]</sup>.

$$\frac{P_R}{P_T} = \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 G_R G_T \quad (1)$$

여기서  $P_R$ 과  $P_T$ 는 안테나의 수신전력 및 송신전력이고  $\lambda$ 는 주파수,  $r$ 은 송신안테나와 수신안테나 사이의 거리,  $G_R$ 과  $G_T$ 는 각각 수신 및 송신안테나의 이득이다.

$\left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2$ 은 전파의 자유공간 감쇠량이다.

전자기장의 거리  $r$  및 안테나의 크기  $D$ 에 따른 영역의 정의<sup>[4]</sup>는 다음과 같다.

- 1) 원거리장 영역:  $\frac{2D^2}{\lambda} < r$
- 2) 근거리장
  - 프레즈넬 영역:  $0.62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} < r < \frac{2D^2}{\lambda}$
  - 리액티브 영역:  $r < 0.62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$

안테나의 대각선의 길이가  $D=0.071$  m인 두 개의 동일한 혼안테나를 사용하여 20 GHz에서 안테나 사이의 거리를 1 mm부터 1 m까지 1 mm 간격으로 측정된 결과가 그림 1에 표시되었다. 이 경우 mm 단위로 원거리  $672 < r$ 이고, 프레즈넬 영역은  $95 < r < 672$ 이며 리액티브 영역은  $r < 95$ 에 해당된다.

그림 1은 거리의 역제곱 법칙을 만족하는 자유공간 감쇠량 dB 단위의 이론값이 프레즈넬 영역의 중간부터 측정값으로부터 벗어나고 있는데 리액티브 영역으로 접근하면서 점점 그 차이가 벌어지고 있는 것을 보여주고 있

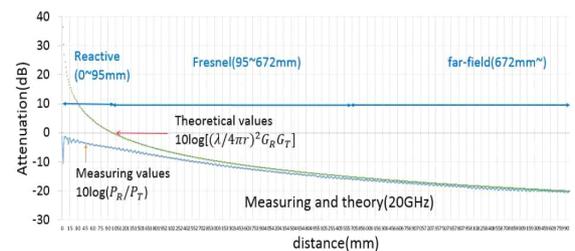


그림 1. 20 GHz에서 감쇠량 측정값과 역제곱 법칙 이론값  
Fig. 1. Measurement value and Theory at 20 GHz.

다. 이러한 차이를 분석하기 위해 프리이스 방정식 (1)을 살펴보자. 좌측 항  $\frac{P_R}{P_T}$ 는 감쇠량 측정값이므로 실측값과 이론값의 차이는 안테나 이득  $G_R$ 과  $G_T$ 에서 유래한다고 볼 수 있다. 이론 계산에서 안테나 이득은 20 GHz의 원거리장에서 일정한 값인  $G_R^0 = G_T^0 = 19.15$  dB로 적용했다. 근거리에서 불일치를 보정하기 위해서 안테나 이득  $G_R$ 과  $G_T$ 는 일정한 상수가 아니라 거리  $r$ 에 의존하는  $G(r)$ 인 것으로 가정한다<sup>[2]</sup>.  $G(r)$ 은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$G(r) = G^0 \left( 1 + \frac{a_1}{r} + \frac{a_2}{r^2} + \dots + \frac{a_n}{r^n} \right) \quad (3)$$

그러면 프리이스 방정식 (1)은 식 (4)와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{P_R}{P_T} &= \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 G_R(r) G_T(r) \\ &= \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \left( 1 + \frac{A_1}{r} + \frac{A_2}{r^2} + \dots + \frac{A_k}{r^k} \right) G_R^0 G_T^0 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $G_R^0$  및  $G_T^0$ 는 일정한 상수로서 원거리장에서 안테나 이득이며  $\left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \left( 1 + \frac{A_1}{r} + \dots + \frac{A_k}{r^k} \right)$ 은 새롭게 제안하는 자유공간 감쇠량이다.  $A_k$ 는 실험값과 이론값을 일치시키는 계수이며 경험적으로 얻는다. 식 (4) 좌변의 추가되는 항  $\left( 1 + \frac{A_1}{r} + \dots + \frac{A_k}{r^k} \right)$ 에서  $r$ 의 역수에 2차까지만 취하면 근사적으로 식 (5)를 얻는다.

$$\frac{P_R}{P_T} \sim \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \left( 1 + \frac{A_1}{r} + \frac{A_2}{r^2} \right) G_R^0 G_T^0 \quad (5)$$

20 GHz에 대해서 각각의 계수  $A_1 = -0.083$ ,  $A_2 = 0.00185$ 를 얻었고<sup>[3]</sup> 그에 따른 피팅 결과는 그림 2에서 볼 수 있다. 식 (5)에 의하여 계산한 이론값과 측정값이 리액티브 영역의 약 50%로 중간 거리 정도인 0.04 m까지 잘 일치함을 볼 수 있다.

30~90 GHz까지 각각 주파수에 대한 계수  $A_1$ 과  $A_2$ 를 경험적으로 산출하였고 보정된 이론값과 측정값이 그림 2와 같이 유사한 결과를 얻었다<sup>[3]</sup>. 100 GHz에 대해서  $A_1 = -0.075$  및  $A_2 = 0.0017$ 을 각각 경험적으로 산출했다. 그에 대한 피팅 결과는 그림 3에서 볼 수 있다.

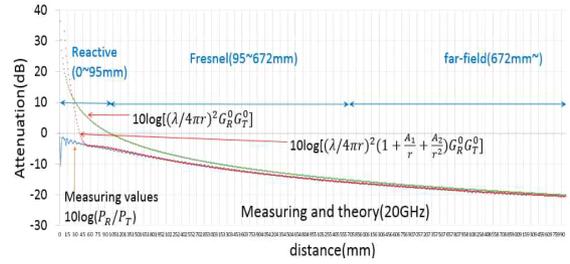


그림 2. 20 GHz에서 역제곱 법칙에 보정항을 추가한 이론값과 측정값이 리액티브 50% 중간까지 일치  
Fig. 2. Addition to correction term shows a good agreement between measurement and theory more than about 50% Reactive range at 20 MHz..

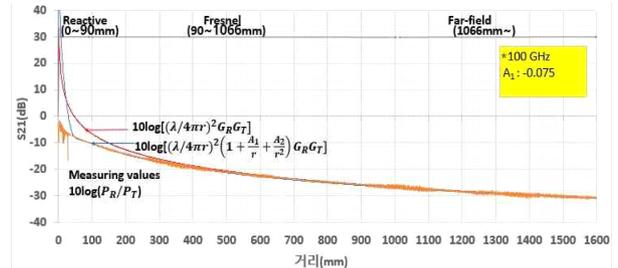


그림 3. 100 GHz의 보정항을 추가한 이론과 실험값 피팅  
Fig. 3. Fitting of 100 GHz after addition of the correction term.

### III. 측정 결과의 불확도 분석

#### 3-1 계측기 불확도

안테나 사이의 삽입손실을 측정하는 계측기로 Keysight사의 네트워크 분석기 N5227B를 사용하였다. 전송계수  $S_{21}$  측정에 미치는 에러는 다음과 같이 추정하였다.

- (1) 네트워크 분석기  $S_{21}$  Magnitude Accuracy
  - 제조사 제공: 0.089 dB
- (2) 네트워크 분석기  $S_{21}$  Dynamic Accuracy
  - 제조사 제공: 0.09 dB
- (3) 네트워크 분석기 Power Level Linearity
  - 제조사 제공: 0.1 dB
- (4) 주파수 범위 및 정확도(frequency range and accuracy)
  - 주파수 오차에 따른 전력의 오차: 1.2 kHz @ 20 GHz

$$\Delta P = 20 \times \log \frac{f}{f + \Delta f} = 0.00000052 \text{ dB}$$

(교정성적서 및 제조사)

### 3-2 케이블 안정도

0.15 dB(제조사 데이터 쉬트)

### 3-3 부정합 불확도

계측기, 케이블 및 안테나 등 측정을 위한 연결 요소들 사이에 임피던스 불일치에 의해 야기되는 반사파에 의한 부정합에 의한 에러로 식 (6)과 같이 계산한다<sup>[5]</sup>.

$$\frac{|\Gamma_i| \cdot |\Gamma_j| \cdot |S_{21}| \cdot |S_{12}| \cdot 100\% \text{ Voltage}}{11.5} \quad (6)$$

$\Gamma_i$ : 선형값의  $i$  장비의 반사계수

$\Gamma_j$ : 선형값의  $j$  장비의 반사계수

$S_{12}, S_{21}$ : 선형값의  $i$  장비와  $j$  장비 사이의 전송계수

### 3-4 안테나 거치 오차에 의한 불확도 분석

#### 3-4-1 상하 위치

안테나 상하 최대 오차 범위를 0.5 mm로 추정, 1 mm 단위로 삽입손실을 측정 후, 값들 중 가장 최악의 경우로 1 mm에서의 측정값을 직각분포의 불확도인  $\frac{0.27}{2\sqrt{3}} = 0.1 \text{ dB}^{[5]}$ 로 추정한다(그림 4 및 표 1).

#### 3-4-2 좌우 위치 오차 추정

안테나 상하 최대 범위를 0.5 mm로 하고 직각확률분포

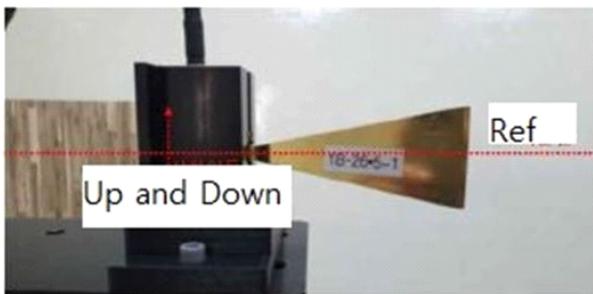


그림 4 안테나 상하의 위치 오차(직각확률분포 추정)  
Fig. 4. Up and down position error (rectangular).

표 1. 안테나 상하 1 mm 가변 측정값 차

Table 1. Measuring according to 1 mm change up and down.

Up and down (mm)	Measurement (dB)	Difference (dB)
3	-24.25	0.04
2	-24.22	0.07
1	-24.03	0.27
0	-24.30	0
-1	-24.37	0.07
-2	-24.28	0.02
-3	-24.36	0.07

를 갖는다고 추정, 1 mm 단위로 삽입손실을 측정 후, 값들 중 가장 최악의 경우로 -1 mm에서의 측정값을 직각분포의 불확도인  $\frac{0.67}{2\sqrt{3}} = 0.135 \text{ dB}^{[5]}$ 로 추정한다(그림 5 및 표 2).

표 2. 안테나 좌우 1 mm 가변 측정값 차

Table 2. Measuring according to 1 mm change left and right.

Left and right (mm)	Measurement (dB)	Difference (dB)
3	-23.86	0.44
2	-24.00	0.30
1	-23.85	0.44
0	-24.30	0
-1	-23.62	0.67
-2	-23.59	0.70
-3	-23.52	0.78

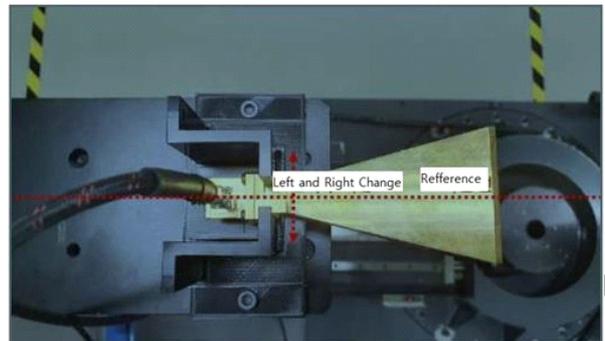


그림 5. 안테나 좌우의 위치 오차(직각확률분포 추정)  
Fig. 5. left and right position error of antenna (rectangular distribution).

### 3-4-3 송수신 안테나 각도 틀어짐 오차

측정 시 송수신 안테나의 최대 틀어진 각도를 0.5도로 추정, 그렇지만 시스템의 각도 분해능이 1도인 관계로 0도에서 3도까지 측정 후 측정값의 경향을 내삽하여 직각 분포로 추정하고 해당 불확도는 0.065 dB로 산정한다(그림 6 및 표 3).

### 3-4-4 혼 안테나 방사 위치의 오차

특정 주파수 성분이 혼 안테나 전체 길이의 1/2 지점에서 방사된다고 가정, 송수신 안테나의 거리  $d_1$ 과 특정 주파수의 방사 및 수신 위치 사이의 거리  $d_2$ 를 전파의 공간 손실의 오차로 추정, 다음 식에 따라 계산한 결과를 직각 분포로 추정하고 20 GHz 안테나 2개의 전체길이는 약 9 cm 차가 되므로 그에 따라 추정된 불확도는 약 0.382 dB 이다(그림 7).

$$\Delta P = 20 \times \log \frac{d_1}{d_2}$$

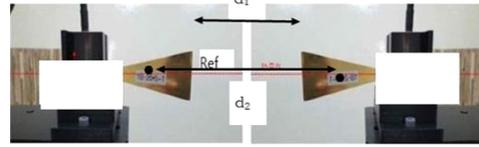


그림 7. 안테나 방사 위치 오차 추정 (20 GHz 기준)  
Fig. 7. Radiated position error of antenna (20 GHz).

### 3-5 안테나 측정 시험장 환경 영향 불확도 분석

시험장 내의 반사파를 직접 측정하였으며 수신안테나를 180도 반전하여 벽으로부터 반사되는 반사파를 측정하고 안테나를 벽쪽으로 45도(상하좌우)로 기울여 각각의 반사파의 세기를 측정하였다. 이 시험장의 반사에 의한 측정값 중 최댓값을 최악의 시험장 환경조건으로 추정하고 불확도 요인으로 산정한다(그림 8 및 표 4).

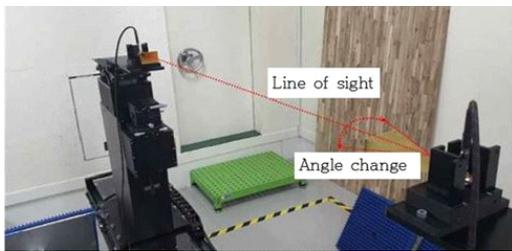


그림 6. 송수신 안테나 좌우 각 정렬 오차 추정  
Fig. 6. Left and right arrangement error of Tx and Rx antenna.

표 3. 송수신 안테나 좌우 각도 1도 가변 측정값 차  
Table. 3. Measurement vlaue for 1 degree difference of antenna angle.

Left and right angle deflection (degree)	Measurement (dB)	Difference (dB)
3	-23.98	0.37
2	-24.09	0.27
1	-24.23	0.13
0	-24.36	0
-1	-24.27	0.09
-2	-24.31	0.05
-3	-24.41	0.05

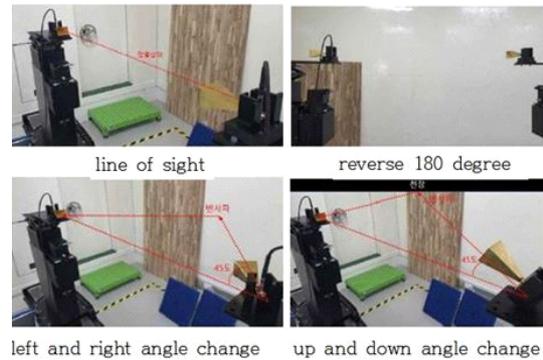


그림 8. 시험장 환경 영향 반사파 오차 추정  
Fig. 8. Reflected wave error due to site effect.

표 4. 시험장 벽으로부터 반사파 측정 데이터  
Table. 4. Reflected wave from wall.

Tx and Rx antenna angle change	Values (dB)	Linear values	
Left and right	+45	-53.26	0.000005
	0	-24.23	0.003779
	-45	-51.89	0.000006
Up and down	+45	-44.33	0.000037
	0	-24.23	0.003779
	-45	-43.93	0.000040
Reverse	180	-43.98	0.000040

식 (7)에 따라 계산하면, 여기서  $P$ 는 송수신 안테나가 서로를 정면으로 향할 때(0도)의 측정 전력이고  $P'$ 은 송수신안테나가 시험장 벽을 향할 때 수신한 선형값의 최대 측정 전력이다.

$$10 \times \log\left(\frac{P-P'}{P}\right) \tag{7}$$

### 3-6 보정된 이론의 실험값 피팅에 따른 불확도 성분 추정

식 (5)에 따라 피팅한 그래프인 그림 3의 dB 값의 데이터를 내삽법으로서 최소 자승법<sup>[6]</sup>에 따라 불확도를 추정하였다. 100 GHz 측정한 데이터를 수정된 공식에 따라 잘 일치하고 있는 부분으로서 그림 3에서 리액티브의 50% 영역, 프레즈넬 및 원거리 영역으로 각각 나누어 다음과 같은 직선의 방정식에 맞추어 기울기  $a$ 와 y 절편  $b$ 를 계산하였다. 데이터  $(x_i, y_i)$ 는 x축을 안테나 사이의 거리 y축을 dB로 표현된 안테나 삽입손실이다.

$$f(x) = ax + b \tag{8}$$

최소자승법에 따르면  $a$ 와  $b$ 는 각각 식 (9) 및 식 (10)과 같이 주어진다.

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \tag{9}$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i y_i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \tag{10}$$

이러한 데이터의 직선 추정에 따른 오차는 식 (11)과 같이 계산한다.

$$S_L = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2 - b \sum_{i=1}^n y_i - a \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n - 2}} \tag{11}$$

계산된 결과는 그림 9 및 표 5와 같다.

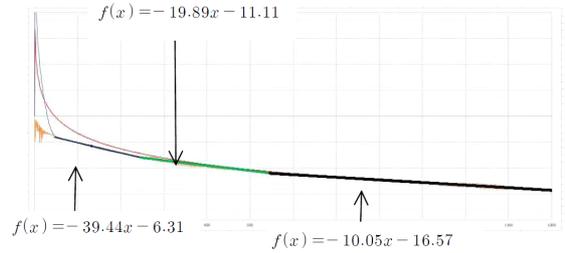


그림 9. 리액티브 50% 부분, 프레즈넬 및 원거리 영역에서 최소자승법 직선 추정

Fig. 9. Least square method for 50% part of reactive, fresnel and far field range.

표 5. 데이터 피팅에 의한 불확도 추정값

Table 5. Uncertainty due to data fitting.

Field Range	a	b	Error (dB)
Reactive	-39.44	-6.31	0.25
Fresnel	-19.89	-11.11	0.48
Far Field	-10.05	-16.57	0.42

### 3-7 A형 불확도

반복추정(11회)(식 (12) 및 표 6)

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (x_k - x)^2}{N(N-1)}} \tag{12}$$

$x_k$ : 측정값,

$x$ : 측정 평균값,

$N$ : 측정 횟수

## IV. 맺음말

본 논문에서는 밀리미터파 대역(20~100 GHz)에서 두 개의 동일한 혼 안테나를 사용하여 근거리 영역 및 원거리 영역을 망라한 장 영역에서 송신 및 수신 안테나 사이의 자유공간 삽입 손실을 측정하였다. 거리의 역제곱 법칙으로서 프리이스 방정식의 자유공간 전송 손실은 근거리 리액티브의 50% 영역 및 프레즈넬 영역에서 측정값과 이론값이 일치하지 않은 사실을 확인하였다. 안테나 이득이 근거리에서 거리에 의존하는 함수임을 가정한 후, 리액티브를 형성하는 영역의 50%의 위치에서도 실험값과 이론값이 잘 일치하는 추가 항을 도입함으로써 근거

표 6. 반복측정 데이터 및 A형 불확도  
Table 6. Measurement and a type uncertainty.

Measurement	Antenna insertion loss (dB)
1	-21.51
2	-21.48
3	-21.51
4	-21.49
5	-21.51
6	-21.50
7	-21.49
8	-21.45
9	-21.46
10	-21.46
11	-21.48
Average	-21.49
A type (dB)	
0.007	

리에서도 성립하는 자유공간 삽입손실 공식을 제안하였다<sup>[3]</sup>. 추가되는 공식은 거리의 역수 및 거리의 역제곱에 비례하는 항을 더한 수식으로 해당하는 항의 계수를 경험적으로 찾아내었다. 이 계수들은 20~100 GHz 주파수 범위에서 본 논문의 혼 안테나에서는 잘 성립하지만 일반적으로 모든 안테나에 적용될지는 추가적 연구가 필요하다.

본 논문에서 근거리 및 원거리에서의 측정 결과와 새로 제안한 공식의 피팅 결과의 신뢰성을 확보하기 위하여 측정불확도 분석을 시도하였다. 안테나 측정 구성에 있어서 계측기 불확도, 케이블 및 각 연결 요소들의 부정확에 의한 전파의 반사, 안테나 정렬 오차, 삽입손실에 영

표 7. 20 GHz~100 GHz 삽입손실 측정의 불확도 총괄표  
Table 7. Uncertainty budget of insertion loss 20 GHz to 100 GHz.

Uncertainty sources		Value	Distribution	Division factor	$u_i$
		dB			dB
A type		0.007	Normal	1	0.007
Instrument	Network analyzer $S_{21}$ accuracy	0.089	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.051
	Network analyzer power level linearity	0.090	Normal	2	0.045
	Network analyzer frequency accuracy	0.000	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.000
	Dynamic accuracy	0.100	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.058
Cable	Tx cable amplitude stability	0.150	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.087
	Rx cable amplitude stability	0.150	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.087
Mismatch	Network analyzer - Tx cable	0.023	Rectangular	$\sqrt{2}$	0.016
	Tx cable - Tx Ant	0.076	U Type	$\sqrt{2}$	0.054
	Network analyzer - Tx Ant	0.002	U Type	$\sqrt{2}$	0.001
	Rx ant - Rx cable	0.045	U Type	$\sqrt{2}$	0.032
	Rx cable - Network analyzer	0.087	U Type	$\sqrt{2}$	0.062
	Rx Ant - Network analyzer	0.003	U Type	$\sqrt{2}$	0.002
Antenna arrangement	Antenna position (up and down)	0.135	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.078
	Antenna position (left and right)	0.335	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.193
	Antenna position (array)	0.065	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.038
	Effects of phase position	0.382	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.221
Effects of site	Reflect wave effect from wall, floor and ceiling	0.080	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.046
Fitting error	Reactive range (more than about 50 % distance from source)	0.25	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.144
	Fresnel range	0.48	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.277
	Far field range	0.42	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.242
Combined standard uncertainty (reactive range), $u_c$					0.384
Combined standard uncertainty (fresnel range), $u_c$					0.451
Combined standard uncertainty (far field range), $u_c$					0.430
Expanded standard uncertainty (The worst value), $U (k=2)$					0.902

향을 줄 수 있는 반사파 등을 야기할 것으로 추정된 시험장 환경에 의한 불확도 요인을 최악의 상황을 가정하여 측정 분석하였으며 근거리 및 원거리에서 실측값과 제안된 보정 이론값 사이에 피팅으로 생성될 수 있는 오차를 최소자승법에 의하여 산정하고 불확도를 추정하였다. 그에 따라 송수신 혼 안테나를 사용하여 근거리 및 원거리의 자유공간 전송손실을 측정할 때의 최악의 경우로 전체 불확도를 95 % 신뢰도( $k=2$ )로서 0.902 dB로 산정하였다.

근거리 장에서도 성립하는 공간 전송 손실 공식을 찾아낸다면 원거리에서 안테나 이득 등을 측정하기 위해서 발생하는 큰 규모의 시설이 필요없게 되며 그에 따라 그 구축 비용을 줄이고 또한 측정 시간을 획기적으로 단축할 것으로 기대한다. 그에 따라 일련의 본 연구들을 통해 보인 바와 같이 원거리 장의 안테나 측정에서 역제곱 법칙을 만족하는 기존의 자유공간 경로 손실 공식에 근거리에서도 측정과 이론이 잘 일치하는 피팅 보정 공식이 성립하는 계수를 주파수 및 안테나 종류를 달리하면서 연구할 필요가 있다고 여겨진다.

## References

- [1] H. T. Friis, "A note a simple transmission formula," *Proceedings of the IRE*, pp. 254-256, May 1946.
- [2] J. Park, S. Choi, and K. Cho, "Near-field measurement and analysis of 20 GHz and 30 GHz millimeter waves in 14th Global Symposium on Millimeter-Waves & Terahertz, Seoul, May 2022.
- [3] J. Park, S. Choi, "Near field measurement and analysis in frequency ranges of 20 GHz to 90 GHz," in *2023 Antenna Measurement Techniques Association Symposium (AMTA)*, Seattle, WA, Oct. 2023.
- [4] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 2nd ed. Chicago, IL, Newark, pp. 149-151, 1997.
- [5] *Electromagnetic Compatibility and Radio Spectrum Matters (ERM): Uncertainties in the Measurement of Mobile Radio Equipment Characteristics Part 1*, ETSI TR 100 028-1, V1.4.1, pp. 34-35, Dec. 2001.
- [6] J. E. Frund, *Experimental Statistics*, Hoboken, NJ, Prentice-Hall, pp. 434-439, 1960.

박 정 규 [국립전파연구원/공업연구원]

<https://orcid.org/0009-0009-4750-0321>



1992년 2월: 고려대학교 물리학과 (이학사)  
 1996년 2월: 고려대학교 물리학과 대학원 (이학석사)  
 1996년 9월~현재: 국립전파연구원 공업연구원  
 [주 관심분야] 안테나 측정, 측정불확도 등

최 술 [국립전파연구원/방송통신주사보]

<https://orcid.org/0009-0008-8319-0394>



2011년 2월: 경희대학교 전자전파과 (공학사)  
 2011년 2월~2016년 10월: LG전자 MC사업본부  
 2020년 3월~현재: 국립전파연구원 방송통신주사보  
 [주 관심분야] 밀리미터파 측정, 방송통신기기 인증시험 등

조 경 룡 [국립순천대학교/교수]

<https://orcid.org/0009-0005-8646-5785>



1987년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학사)

1987년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학석사)

1995년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학박사)

1991년 2월~1996년 2월: SK텔레콤 중앙

연구원 선임연구원

1996년 3월~현재: 순천대학교 인공지능공학부 교수

[주 관심분야] 이동통신 등