

# 안테나 이득비교법의 측정 불확도 개선 방안

강진섭·김정환

한국표준과학연구원

## I. 서론

산업사회가 정보화·고도화되면서 통신, 국방/보안, 항공우주, 교통/안전 등 여러 분야에서 안테나를 사용하는 전자파 관련 기기/시스템의 사용이 급증하고 있으며, 다양한 사양을 만족하는 고기능, 고성능의 안테나 기기/시스템들이 속속히 개발되고 있다.

안테나의 전기적인 특성은 이득, 방사 패턴, 편파 특성 등에 의해 주로 결정되고, 이들 특성 파라미터가 무선 통신 시스템의 성능을 좌우하므로 정확한 특성 측정이 요구된다. 한정된 전파 자원의 효율적인 운영 및 열악해지는 전파환경의 능동적인 관리를 위해서는 무선 통신 시스템의 중단에 사용되는 안테나 특성에 대한 신뢰성 있는 정확한 측정이 반드시 필요하다.

일반적으로 안테나 특성 파라미터 중에서 가장 중요한 것은 (전력)이득(power gain)이다. 대부분의 산학연에서는 안테나의 이득 측정을 위해 이득비교법<sup>[1][2]</sup>을 많이 사용하고 있으나, 관련 측정 이론을 정확히 이해하고 사용하는 기관은 많지 않은 실정이다.

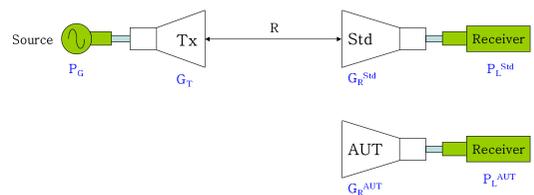
우리나라 측정 표준 대표 기관인 한국표준과학연구원에서는 안테나 측정에 관심이 있는 산학연을 대상으로 안테나 측정 기술을 보급하고, 측정의 어려움에 대한 해결 방안을 제시하며, 관련 분야 종사자들에게 만남의 장을 제공하기 위해 2008년부터 안테나 측정클럽을 창립하여 운영해 오고 있으며, 회원기관의 요청으로 회원기관 사이의 안테나 측정 능력을 상호 비교하는 프로그램을 2009년부터 매년 주관하여 실시해 오고 있다<sup>[3]</sup>. 그동안 상호 비교 프로그램

에 참여하는 모든 기관에서는 안테나 이득 측정에 이득비교법을 사용하였다.

여기서는 그동안 안테나 특성 측정 상호 비교 프로그램을 주관해 오면서 습득된 안테나 이득비교법의 측정 불확도 개선 방안을 기술하였다. II에서는 이득비교법을 이용한 통상적인 측정 과정을 기술하고, III에서는 이득비교법에 대한 측정 이론을 기술하였다. IV에서는 이득비교법을 사용하는 경우, 보다 정확한 이득을 얻을 수 있는 방안을 기술하고, V에서 요약하였다.

## II. 안테나 이득비교법을 이용한 통상적인 이득 측정

일반적으로 산학연에서 이득비교법을 사용하는 경우, [그림 1]에서와 같이 기준 안테나(standard antenna)와 피측정 안테나(AUT, Antenna Under Test)를 수신 안테나로 사용한다. 이 경우, 이득  $G_R^{Std}$ 을 알고 있는 기준 안테나를 수신 안테나로 사용하여 수신 전력  $P_L^{Std}$ 을 측정하고, 기준 안테나를 AUT로 교체한 후 수신 전력  $P_L^{AUT}$ 을 측정하면 후, 식 (1)을 사용하여



[그림 1] 안테나 이득비교법을 이용한 통상적인 이득 측정

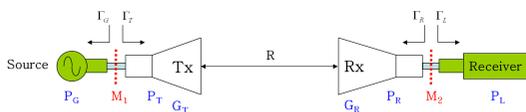
AUT의 이득  $G_R^{AUT}$ 을 얻는다.

$$G_R^{AUT} = \frac{P_L^{AUT}}{P_L^{Std}} G_R^{Std} \quad (1)$$

식 (1)을 이용하면 기준 안테나의 이득과 기준 안테나 및 AUT에 대한 수신 전력만으로 기준 안테나, AUT 및 수신기의 임피던스 정보 없이도 AUT 이득을 용이하게 얻을 수 있으나, 기준 안테나, AUT 및 수신기의 임피던스 특성 차이에 의한 부정합 효과를 무시하고, IV에 기술될 내용들을 고려하지 않으면 정확한 이득 측정값을 얻기에는 한계가 있다.

### III. 안테나 이득비교법 측정 이론

[그림 2]와 같이 송신/수신 안테나의 편파가 서로 정합되어 있고, 두 안테나의 main beam이 서로 정렬되어 있으며, 서로 원거리장(far-field) 조건을 만족한다고 가정하자. 그리고 출력 전력이  $P_G$ 인 신호원으로부터 발생된 신호 중 일부가 신호원과 송신 안테나( $T_X$ )의 임피던스 부정합  $M_1$ 으로 인해 이득이  $G_T$ 인 송신 안테나에  $P_T$ 의 전력이 공급되어 공간으로 복사되는 경우에 송신 안테나로부터  $R$  만큼 떨어진 거리에 위치한 이득이  $G_R$ 인 수신 안테나( $R_X$ )에 의해  $P_R$ 의 전력이 수신되어 이 수신 신호의 일부가 수신안테나와 수신기의 임피던스 부정합  $M_2$ 로 인해 수신기에  $P_L$ 의 전력으로 측정된 경우를 가정하자. 이런 경우, 수신기에서 측정된 전력  $P_L$ 을 Friis 전송식을 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있다<sup>[1],[2]</sup>.



[그림 2] 안테나 이득비교법을 이용한 안테나 이득 측정

$$P_L = P_G M_1 G_T \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_R M_2 \quad (2)$$

여기서  $\lambda$ 는 신호의 파장을 의미하고,  $M_1$ 과  $M_2$ 는 각각 식 (3)과 같이 정의되는 송신부와 수신부의 임피던스 부정합 인자를 의미한다.

$$M_1 = \frac{(1 - |\Gamma_G|^2)(1 - |\Gamma_T|^2)}{|1 - \Gamma_G \Gamma_T|^2}$$

$$M_2 = \frac{(1 - |\Gamma_R|^2)(1 - |\Gamma_L|^2)}{|1 - \Gamma_R \Gamma_L|^2} \quad (3)$$

식 (3)에서  $\Gamma_G$ ,  $\Gamma_T$ ,  $\Gamma_R$ ,  $\Gamma_L$ 는 각각 신호원, 송신안테나, 수신안테나, 수신기의 반사계수를 의미한다.

기준 안테나와 AUT를 수신 안테나로 사용하는 경우, 식 (2)에서 신호원부터 공간 손실까지를 상수  $A$ 로 표현할 수 있다.

$$P_L = A G_R M_2 \quad (4)$$

식 (4)로부터 기준 안테나와 AUT를 수신 안테나로 사용하고 얻은 전력을 각각  $P_L^{Std} (= A G_R^{Std} M_2^{Std})$ ,  $P_L^{AUT} (= A G_R^{AUT} M_2^{AUT})$ 이라 하면, 식 (1)을 이용하여 AUT의 이득 표현식을 얻을 수 있다.

$$G_R^{AUT} = \frac{P_L^{AUT}}{P_L^{Std}} G_R^{Std} \frac{M_2^{Std}}{M_2^{AUT}} \quad (5)$$

식 (5)는 송신/수신 안테나의 편파가 서로 정합되어 있고, 두 안테나의 main beam이 서로 정렬되어 있으며, 서로 원거리장 조건을 만족하고, 송신부와 수신부의 임피던스 부정합 인자( $M_1$ ,  $M_2$ )를 알고 있는 경우, 식 (1)보다 정확한 이득 측정 결과를 줄 수 있다.

한편, 만약 수신기의 반사계수가  $|\Gamma_L| \ll 1$  조건을

만족하면, 식 (5)를 식 (6)과 같이 근사할 수 있다.

$$G_R^{AUT} \approx \frac{P_L^{AUT}}{P_L^{Std}} G_R^{Std} \frac{(1 - |\Gamma_R^{Std}|^2)}{(1 - |\Gamma_R^{AUT}|^2)} \quad (6)$$

식 (6)으로부터 AUT의 이득을 수신기의 반사계수 정보 없이도 기준 안테나 및 AUT를 수신 안테나로 사용하고 측정된 전력, 두 안테나의 반사계수, 기준 안테나의 이득으로부터 얻을 수 있음을 알 수 있다. 만약 기준 안테나 및 AUT의 반사계수를 모르거나, 측정하기 어려운 경우, 식 (6)을 변형한 식 (7)을 사용하면 기준 안테나 및 AUT를 수신 안테나로 사용하고 측정된 전력과 기준 안테나의 입사 전력 이득 (incident power gain 또는 realized gain)  $G_R^{Std}(1 - |\Gamma_R^{Std}|^2)$ 으로부터 AUT의 이득  $G_R^{AUT}$  대신에 입사 전력 이득  $G_R^{AUT}(1 - |\Gamma_R^{AUT}|^2)$ 을 얻을 수 있다.

$$G_R^{AUT}(1 - |\Gamma_R^{AUT}|^2) \approx \frac{P_L^{AUT}}{P_L^{Std}} G_R^{Std}(1 - |\Gamma_R^{Std}|^2) \quad (7)$$

#### IV. 안테나 이득비교법의 측정 불확도 개선 방안

##### 4.1 기준 안테나 요건

이득비교법을 사용하여 정확한 측정 결과를 얻기 위해서는 기준 안테나와 AUT가 가급적 유사한 전기적/물리적 특성을 가져야 한다. 이는 AUT가 다이폴 안테나인 경우, 전기적/물리적 특성이 많이 다른 표준 이득 혼 안테나를 기준 안테나로 사용할 수 없음을 의미하며, AUT가 이득이 20 dB인 표준 이득 혼 안테나인 경우보다 정확한 이득을 얻기 위해서는 가급적 이득이 20 dB에 가까운 표준 이득 혼 안테나를

기준 안테나로 사용하는 것이 바람직함을 의미한다.

최소한 국가 측정 표준에 소급성을 가지는 교정된 안테나를 기준 안테나로 사용해야 되며, 교정된 안테나가 여러 개가 있다면 이득의 측정 불확도가 작은 안테나를 기준 안테나로 선택해야 된다. 또한 안테나가 어떠한 조건(예를 들어 정렬 조건)에서 교정이 되었는지에 대한 숙지가 필요하다.

기준 안테나를 한번 교정을 하면 통상적으로 장기간 사용하므로 외부 충격에 특성이 변하지 않도록 구조적으로 견고한 안테나를 기준 안테나로 선택해야 된다.

##### 4.2 송신/수신안테나의 정렬

안테나의 전기적/물리적 특성 중에서 어떤 것을 정렬 기준으로 사용할 것인지를 우선 정의한다. 물리적인 특성을 사용하는 경우, 정렬 기준이 안테나의 개구면인지 급전부인지를 확인하고, 정의된 기준면에 대해 레이저를 이용하여 두 안테나를 정렬한다. 한편, 전기적인 특성을 정렬 기준으로 사용하는 경우, 수신기의 수신 전력이 최대가 되도록(즉, 두 안테나 사이의 삽입 손실이 최소가 되도록) 두 안테나를 정렬한다.

##### 4.3 송신/수신안테나의 편파 특성 정합

두 안테나가 선형 편파 특성을 가지는 경우, 우선 두 안테나를 정렬시킨 후 하나의 안테나를 회전시키면서 수신 전력이 최소가 되는 각도를 찾은 후, 이 각도에 대해 90°를 회전시켜 두 안테나를 편파 정합시킨다.

##### 4.4 원거리장 조건

송신/수신 안테나의 개구면 크기로부터 계산된 원거리장 거리를 각각  $R_T = 2D_T^2/\lambda$ ,  $R_R = 2D_R^2/\lambda$ 이라 하면, 두 안테나의 이격 거리  $R$ 은 각 안테나의

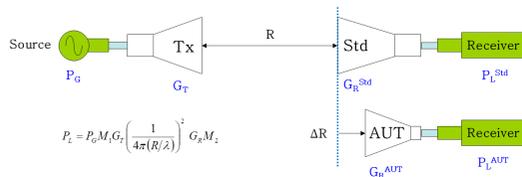
원거리장 거리의 합보다 커야 된다(즉,  $R > R_T + R_R$ ). 여기서  $D_T$ 와  $D_R$ 은 송신/수신안테나 개구면의 최대 크기(대각선 길이)를 각각 의미한다.

#### 4.5 송신/수신 안테나의 이격 거리 유지

식 (2)에서 이격 거리가 증가하면 수신 전력이 감소하므로, 이득비교법을 이용하기 위해서는 기준 안테나와 AUT의 크기가 다른 경우에도 송신/수신 안테나의 이격 거리를 일정하게 유지해야 된다(그림 3). <표 1>로부터 이격 거리가 10 % 감소하거나 증가하면 수신 전력이 약 0.92 dB 증가하거나, 약 0.83 dB 감소하는 것을 볼 수 있다.

#### 4.6 안테나 무향실 요건

원거리장 조건을 만족하고 AUT를 평가할 수 있는 충분한 quiet zone을 확보해야 되며, 수신 안테나



[그림 3] 송신/수신 안테나의 이격 거리 유지

<표 1> 이격 거리 변화에 따른 수신 전력 변화량

$\Delta R/R$ (%)	$R/(R-\Delta R)$ (dB)	$R/(R+\Delta R)$ (dB)
1	0.087	-0.086
3	0.265	-0.257
5	0.446	-0.424
7	0.630	-0.588
10	0.915	-0.828
15	1.412	-1.214
20	1.938	-1.584

뒤쪽 벽면으로부터의 반사파의 영향을 적게 받기 위해 수신단이 뒤쪽 벽면 흡수체로부터 충분히 이격되어 있어야 된다.

#### 4.7 측정 시스템 Power Budget

수신기가 선형 동작 영역에서 동작할 수 있도록 안테나 측정 시스템을 적절히 구성하고, 신호원의 출력신호 크기를 적절히 설정해야 된다. 만약 수신 신호가 크기가 작아 신호 증폭기를 사용하는 경우, 신호 증폭기의 표류(drift) 영향을 적게 받을 수 있도록 측정 시스템을 적절히 구성해야 된다.

#### 4.8 송신/수신 안테나 사이 다중 반사

두 안테나 사이 이격 거리가 원거리장 조건을 만족하지 못한다면 두 안테나 사이의 다중 반사 효과를 고려할 필요가 있다. 다중 반사파가 정재파 특성을 가져 주기가  $\lambda/2$ 이므로, 이 효과를 제거하기 위해서는 이격 거리를 측정점을 기준으로 앞뒤로  $\lambda/8$ 의 정수배만큼 변화시켜(즉,  $R \pm n\lambda/8$  ( $n=0,1,2$ )) 얻은 측정값의 평균을 사용하면 된다.

#### 4.9 수신기의 임피던스 특성

수신기의 임피던스 특성(즉, 반사계수  $\Gamma_L$ )이 좋지 않으면 식 (5)에서 기준 안테나/AUT와 수신기의 연결부에서 부정합 특성  $M_2^{Std}/M_2^{AUT}$ 이 나빠지게 된다. 이런 경우, 반사계수 특성이 좋고, 가능하다면 감쇠량이 최소한 6 dB 이상 되는 감쇠기를 수신기 입력단에 부착하고 사용하면 성능을 개선할 수 있으며,  $|\Gamma_L| \ll 1$  조건을 만족하면 식 (6)을 사용하여 AUT 이득을 얻을 수도 있다.

#### 4.10 임피던스 측정 요건

식 (5)에서 부정합 효과를 고려하기 위해서는 벡터 회로망 분석기와 같은 반사계를 사용하여 기준 안테

나, AUT 및 수신기의 임피던스를 측정할 필요가 있다. 실제 상황에서는 안테나 무향실 외부에 있는 벡터 회로망 분석기의 측정 단자에 길이가 긴 RF 케이블의 한쪽 단자를 연결하고, RF 케이블의 반대쪽 단자를 안테나 무향실 내부로 가지고 가서 측정하려는 기기에 부착하여 임피던스를 측정한다. 만약 RF 케이블의 길이가 너무 길어 전송 손실이 크면 벡터 회로망 분석기를 교정할 수 없다. 이 경우, 적절한 전송 손실 특성을 가지며, 가능하다면 길이가 짧은 RF 케이블을 사용하거나, 벡터 회로망 분석기를 안테나 무향실 내부로 이동시켜 임피던스를 측정할 필요가 있다.

## V. 결 론

일반 산학연에서 안테나 이득 측정 시 널리 사용되고 있는 안테나 이득비교법에 대한 측정 불확도 개선 방안을 기술하였다.

안테나 이득비교법을 사용하는 경우, 측정 불확도를 개선하기 위해서는 AUT와 물리적/전기적으로 유사한 특성을 가지는 교정된 안테나를 기준 안테나로 사용해야 된다.

그리고 송신/수신 안테나의 편파가 서로 정합되

어 있고, 두 안테나의 main beam이 서로 정렬되어 있으며, 두 안테나의 이격 거리가 원거리장 조건을 만족하면서 동시에 이격 거리를 일정하게 유지하면서 수신 전력을 측정해야 되며, AUT 이득 계산 과정에서 임피던스 부정합 효과를 고려해야 된다.

또한 안테나 무향실은 원거리장 및 quiet zone 조건을 만족할 수 있는 크기이어야 하며, 수신 전력 측정 시스템은 수신기가 선형 동작 영역에서 동작할 수 있도록 적절히 구성되어야 하고, 필요하다면 송신/수신 안테나 사이 다중 반사 효과를 고려하고, 수신부의 임피던스 특성을 개선해야 된다.

## 참 고 문 헌

- [1] IEEE Standard 149-1979, IEEE Standard Test Procedures for Antennas.
- [2] J. D. Kraus, R. J. Marhefka, *Antennas for All Applications, Third edition*, McGraw Hill, 2002.
- [3] J. S. Kang, J. H. Kim, J. I. Park, N. W. Kang, and Y. H. Lee, "Comparison of gain and radiation pattern of R-band antennas", *33<sup>rd</sup> Annual AMTA (Antenna Measurement Techniques Association) Symposium*, pp. 106-111, Englewood, Colorado, Oct. 16-21. 2011.

≡ 필자소개 ≡

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: 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 측정 표준(산란계수, 안테나, 물질상수, (sub-)mm-wave 측정 등)

김 정 환



1978년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)

1980년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)

2000년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)

1981년 10월~현재: 한국표준과학연구원 전자파센터 책임연구원

[주 관심분야] 전자파 측정 표준(RF 전압, 전력, 안테나, 물질상수 등)