

시간 영역에서 안테나 이득 측정 연구

Antenna Gain Measurement in Time Domain

박 정 규 · 김 우 년

Jungkuy Park · Woo-Nyun Kim

요 약

일반적으로 안테나 이득 또는 인자를 측정하는 방법으로서 3-안테나법, 표준안테나법, 표준시험장법 등이 있다. 이들 방법은 주파수 영역에서 반사파 등을 고려하여 자유 공간 또는 준자유 공간의 값을 측정한다. 본 논문은 시간 영역에서 반사파를 추적 제거함으로써 야외시험장에서 자유 공간 안테나 이득·인자를 측정 및 교정하는 방법을 논의한다. 시간 영역에서 측정된 전송 계수 S_{21} 으로부터 직접파 및 반사파가 수신 안테나에 도달하는 시간차로 이들을 구분하고, 게이팅 기능과 역 푸리에 변환으로 직접파의 주파수 응답만을 추출하였다. 시간 영역 기능을 갖추고 있는 네트워크 분석기로 안테나 높이를 변화시키면서 이들 파의 경로차를 만들어 1~18 GHz 대역 더블리지 혼 안테나의 반응시간을 분석하였으며, 그 경로차에 의한 응답을 분리 추출하여 자유 공간 안테나 이득을 측정하였다. 이 결과를 ANSI C63.5의 표준시험장법으로 교정한 결과와 상호 비교하여 좋은 일치 가능성이 있음을 보였다.

Abstract

There are several antenna calibration methods, so-called 3-Antenna Method, Standard Site Method, and Standard Antenna Method which measure the antenna gains or antenna factors. These methods yield the free space or quasi free space antenna gains in only the frequency domain. In this paper, an antenna calibration method using the time domain in the open area test site is discussed. The reflected waves due to the ground are traced in the time domain. After they are removed by the time gating function of network analyzer, the free space transmission coefficient S_{21} is extracted. Such a way is applied to the broad band horn antenna ranging 1 GHz to 18 GHz, and the free space gains are obtained by Friis transmission equation. The method is checked by Standard Site Method in open area test site. The results show comparatively good agreement except for 18 GHz.

Key words : Time Domain, Frequency Domain, Gating, 3-Antenna Method, Standard Site Method

I. 서 론

안테나 이득 또는 인자를 측정하는데 있어서 주변의 반사파는 방해 요인이다. 이를 해결하기 위한 방법으로서 표준시험장법^[1], 높이스캔 평균법^[2], 챔버에서의 측정 등 다양한 기술들이 이용되고 있다.

이들 방법은 자유 공간 안테나 이득 또는 준자유 공간 안테나 이득 등을 주파수 영역에서 측정하고 있다.

컴퓨터 계산 능력 및 측정기의 속도와 성능이 향상되어 시간 영역 전자파 측정이 용이하게 되었다. 주파수 영역과는 달리 시간 영역은 안테나 사이의 직접파와 반사파의 경로차에 의한 도달 시간의 차이

방송통신위원회 국립전파연구원(National Radio Research Agency of KCC)

· Manuscript received June 1, 2012 ; Revised September 26, 2012 ; Accepted October 4, 2012. (ID No. 20120601-066)

· Corresponding Author : Jungkuy Park (e-mail : niehaner@gmail.com)

를 구분할 수가 있어 신호들을 분리할 수가 있다. 시간 영역에서 전송 계수 S_{21} 에 대해 직접파와 반사파를 구분하여 NIST의 Camel은 1~9 GHz 대역 혼 안테나의 자유 공간 안테나 인자 측정 방법에 관하여 논의하였다^[3].

본 논문에서는 고 성능 벡터 네트워크 분석기^[4]에서 이산푸리에 변환과 시간 영역에서 게이팅 기능을 이용하여 금속 도체면을 가진 야외시험장에서 안테나의 높이를 가변하면서 직접파와 반사파를 분석하였다. 그 결과로 안테나의 시간 응답을 구분하였고, 반사파를 추적 구분하여 직접파 만의 전송 계수 S_{21} 을 추출하여 1~18 GHz 대역 더블리지 혼 안테나의 자유 공간 안테나 이득을 3-안테나법^[5]에 의하여 산출하였다. 이 결과를 ANSI C63.5의 표준시험장법^[6]으로 측정된 결과와 상호 비교하였다.

II. 시간 영역 측정의 기본

2-1 네트워크 분석기에서 푸리에 변환 기능

네트워크 분석기의 시작 주파수를 f_0 종료 주파수를 f_N 이라 하면 주파수 간격이 $\Delta f = (f_N - f_0)/N$ 인 $N+1$ 개의 S_{21} 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S_{21_{fre}}(f) = \sum_{k=0}^N S_{21}^k \delta[f_k - (k\Delta f + f_0)] \quad (1)$$

여기서 S_{21}^k 는 k 번째 전송 계수의 값이며, δ 는 디랙의 델타함수이다. 주파수 영역에서 전송 계수 $S_{21_{fre}}(f)$ 의 이산 역푸리에 변환은 다음과 같이 주어진다.

$$S_{21_{time}}(t) = \frac{1}{N+1} \sum_{k=0}^N S_{21_{freq}}(f) e^{j2\pi kn/(N+1)} \quad (2)$$

($n=1, 2, \dots, N+1$)

식 (1)에서 식 (2)로의 변환 및 그 역과정은 벡터 네트워크 분석기에서 수행된다. 시간 영역에서 게이팅은 크기가 1이고, 시작 시간과 종료 시간을 임의로 정할 수 있는 그림 1과 같은 사각형 함수 $G(t)$ 와 시간 영역의 신호 $S_{21_{time}}(t)$ 와의 곱으로 고려할 수 있다.

2-2 측정 범위

식 (1)은 주파수 영역에서 $N+1$ 개의 주파수를 샘플링한 것이며, 그 역푸리에 변환은 시간 영역에 걸쳐

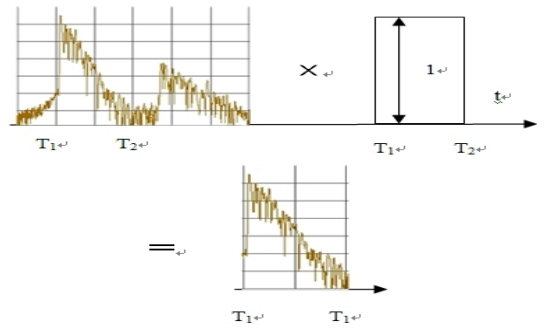


그림 1. 사각형 함수의 곱으로 고려되는 게이팅
Fig. 1. Time gating.

서 엘리어싱(Aliasing)이 발생하지 않아야 한다. 그에 따라 시간 영역의 측정 범위는 시간 응답의 반복이 발생하지 않는 영역으로 정의되며, 이 범위에서의 측정이 유효하다. 샘플링 이론에 따르면 시간의 길이 T 가 샘플링 주파수 간격 Δf 에 대해 $1/\Delta f$ 보다 클 때 엘리어싱이 발생한다. 그러므로 시간 영역에서 측정 범위는 $T \leq 1/\Delta f$ 이어야 한다. 식 (1)의 샘플링에 대해 시간 영역의 유효한 측정 범위는 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{\Delta f} = \frac{1}{(f_N - f_0)/N} = \frac{N}{f_N - f_0} \quad (3)$$

시간 측정 범위는 네트워크 분석기 주파수 샘플링수(number of point)에 비례하고, 주파수 스패(span)에 반비례한다. 전자파는 광속 c 로 진행하므로 유효한 측정이 되는 거리 범위 D 는 다음과 같이 주어진다.

$$D = T \times c \quad (m) \quad (4)$$

직접파와 반사파는 이 측정 범위에 놓여야 한다. 두 파가 분리되기 위해서는 응답이 그림 2와 같이

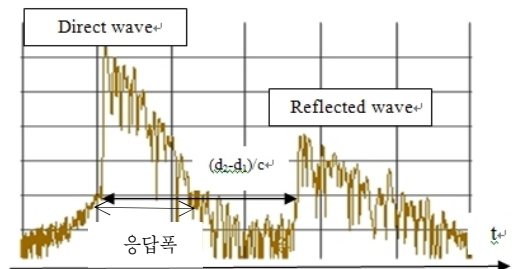


그림 2. 직접파와 반사파의 분해
Fig. 2. Resolution of the direct and reflected wave.

겹치지도 말아야 한다. 그림 2에서 보는 바와 같이 직접파 및 반사파가 수신 안테나에 도달하는 시간차 $(d_1 - d_2)/c$ 가 직접파의 응답폭보다 길어야 한다.

2.3 측정 절차

두 안테나 사이의 거리를 원거리장 조건에 맞추고, 기하광학적인 방법으로 주어진 높이에서 반사파의 경로를 계산한다. 식 (3)과 (4)에 따라 측정할 주파수 대역에서 시간 영역 범위가 직접파와 반사파의 경로를 만족하도록 네트워크 분석기의 샘플링 수와 시작 및 종료주파수를 설정한다. 주파수 영역에서 전송 계수 S_{21} 을 측정한다 다음 그 데이터를 시간 영역으로 변환한다. 시간 영역에서 직접파와 반사파를 구분하고, 직접파의 응답폭을 분석한다. 직접파와 반사파가 구분이 되지 않거나 직접파의 응답폭 내에 반사파가 겹쳐 있으면 직접파와 반사파가 분리되도록 안테나의 높이를 증가시킨다. 두 파가 분리되면 직접파만의 게이팅 작업을 한다. 이때 직접파의 응

답폭을 모두 포함하여 게이팅을 하고 역푸리에 변환으로 주파수 영역에서 직접파만의 전송 계수 S_{21} 을 얻는다. 3개의 안테나의 3쌍에 대하여 위와 같은 절차를 반복하여 3쌍의 주파수 영역 S_{21} 으로 다음과 같은 Friis 방정식^[5]에 따라 자유 공간 안테나 이득을 계산한다.

$$G_T G_R = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \frac{P_R}{P_T} \tag{5}$$

III. 측 정

3-1 측정영역 구성과 반사파 추적

3-1-1 측정영역 구성

네트워크 분석기 주파수 샘플링 수는 1,801개, 측

표 1. 측정 설비

Table 1. Specification of facilities.

야외시험장 접지평면	크기	5,000 cm × 4,000 cm
	재질	금속 + 매쉬
안테나 마스트	1,000 cm 높이	
네트워크 분석기	Agilent N/A E8362B	

표 2. 사용된 안테나

Table 2. Antennas.

제조사	형식	모델	분류	주파수
Schwarzbeck	Double ridged horn	BBHA9120D(1)	A	1~18 GHz
		BBHA9120D(2)	B	
EMCO		3115	C	

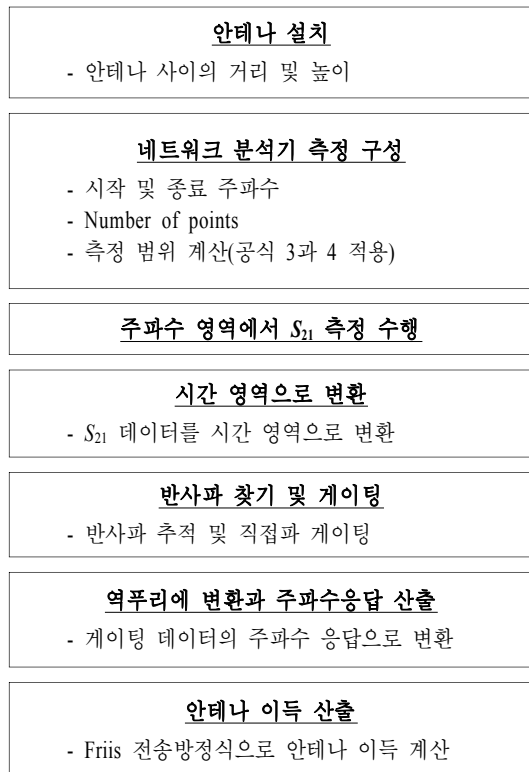


그림 3. 시간 영역 측정 절차
Fig. 3. Measurement procedure.



그림 4. 안테나 교정 야외시험장
Fig. 4. OATS for antenna calibration.

표 3. 시간 영역에서 측정 범위

Table 3. Measurement ranges in time domain.

주파수 스펠(0.01 ~ 18 GHz)	17.99 GHz
측정점의 수	1,801
최대 시간 범위	100.02 ns
최대 거리 범위	30.02 m

정주파수 범위는 0.01 GHz에서 18 GHz로 설정하였다. 그에 따른 측정 범위는 표 3에서 보는 바와 같다. 반사파를 추적하기 위하여 안테나를 야외시험장 급속접지평면 위에 그림 5와 같이 설치하였다.

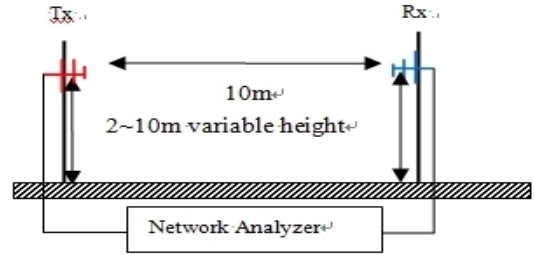
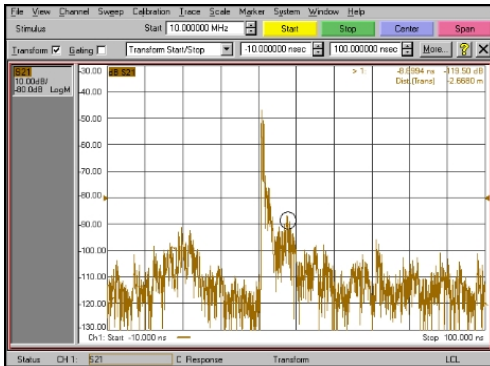


그림 5. 반사파 추적을 위한 구성

Fig. 5. Configuration for tracing the reflected wave.

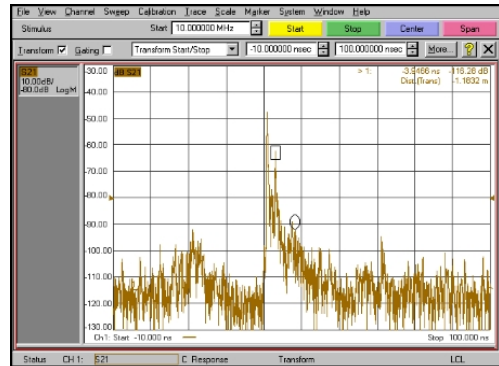
3-1-2 시간 영역 측정 및 반사파 추적

그림 6의 (a)에서 (i)까지 10 m 거리에서 안테나



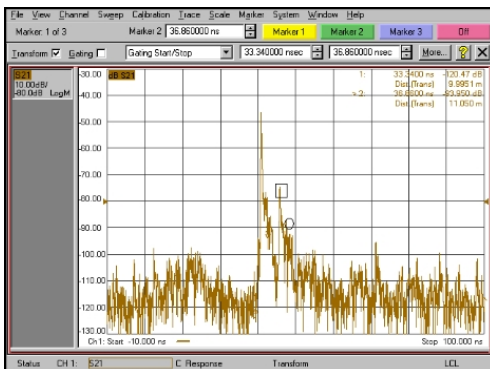
(a) 1 m 높이에서 시간 영역 응답 : 원안이 반사파로 보이나, 직접파와 반사파의 구분 어려움

(a) Time domain response at height 1 m



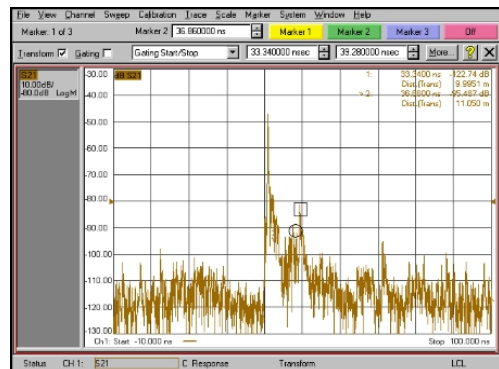
(b) 2 m 높이에서 시간 영역 응답 : 반사파가 분리되기 시작(네모안의 신호), 원안의 신호는 (a)와 같은 위치와 세기로 그대로 유지

(b) Time domain response at height 2 m



(c) 3 m 높이에서 시간 영역 응답 : 네모안의 반사파 신호는 (b)에 비해 우측으로 이동, 원안의 신호는 위치 및 세기 불변

(c) Time domain response at height 3 m

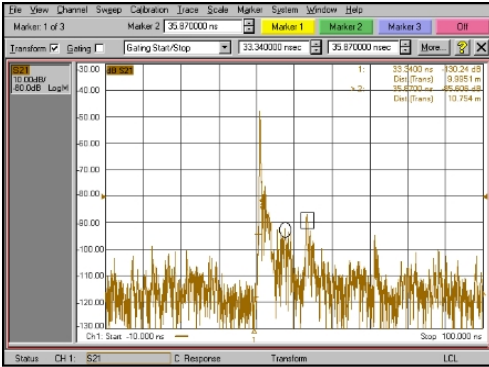


(d) 4 m 높이에서 시간 영역 응답 : 네모안의 반사파는 우측으로 더 이동하고 원안의 신호는 위치 및 세기 불변

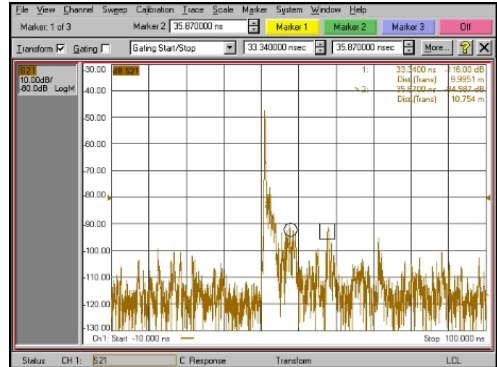
(d) Time domain response at height 4 m

그림 6. 안테나 높이에 따른 경로차를 이용한 반사파 추적

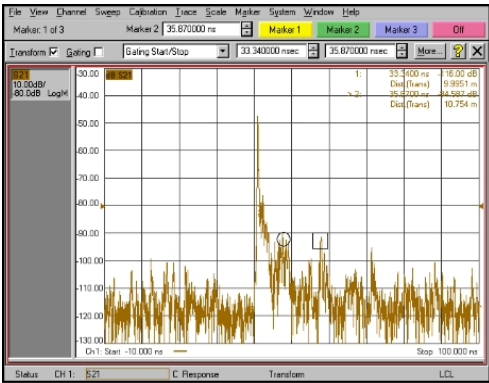
Fig. 6. Tracing of reflected wave using path differences according to height.



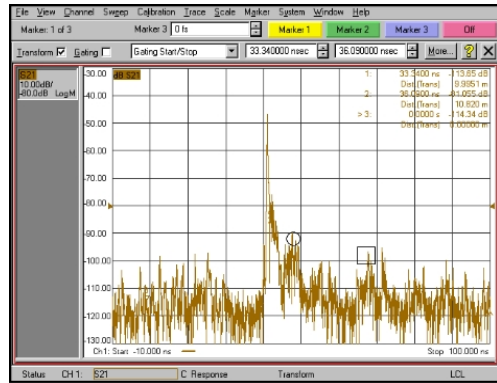
(e) 5 m 높이에서 시간 영역 응답 : 네모안의 신호는 우측으로 더 이동하고 세기는 약해졌으나 원안의 신호는 위치 및 세기 불변
(e) Time domain response at height 5 m



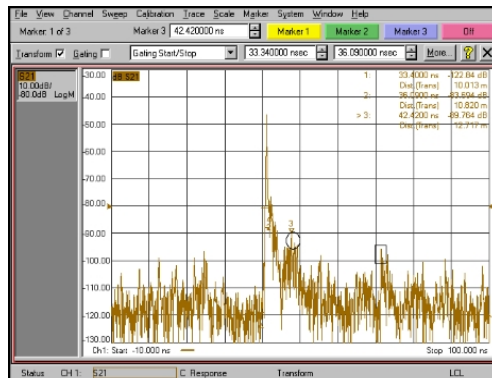
(f) 6 m 높이에서 시간영역 응답
(f) Time domain response at height 6 m



(g) 7 m 높이에서 시간 영역 응답
(g) Time domain response at height 7 m



(h) 8 m 높이에서 시간 영역 응답 : 네모안의 신호는 오른쪽으로 이동하며 세기가 점점 작아지고 잡음 수준까지 떨어졌으나, 원안의 신호는 (a)에서 (g)에서와 마찬가지로 위치 및 세기는 변동이 없음
(h) Time domain response at height 8 m



(i) 9 m 높이에서 시간 영역 응답
(i) Time domain response at height 9 m

그림 6. 계속
Fig. 6. Continue.

높이를 1 m부터 9 m까지 가변시키면서 직접파와 반사파를 추적하였다.

IV. 측정 결과 분석

4.1 페르마(Fermat)의 원리와 반사파 경로 분석

페르마의 원리에 따르면 두 점 사이를 진행하는 전자파는 시간이 최소가 되는 경로를 택한다. 반사법칙은 이 원리로부터 유도되며, 입사각과 반사각이 같도록 경로가 결정된다.

지향성을 가진 혼 안테나라도 시험장 바닥면으로 향하는 전자파장이 존재하며, 그 전기장은 그림 7과 같이 바닥면의 일정한 영역에서 반사되어 수신 안테나의 단면적으로 포획될 것이다.

송신안테나의 임의의 위치 (x_1, y_1, z_1) 에서 출발한 전자파는 반사법칙에 따라 $(x_1, y_1, -z_1)$ 에서 출발하여 수신 안테나 단면의 어떤 위치 (x_2, y_2, z_2) 에 도달한다. 그에 따라 직접파 및 반사파 경로 d_1, d_2 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} d_1 &= \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \\ d_2 &= \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 + z_1)^2} \end{aligned} \quad (6)$$

혼 안테나 개구면의 중심과 중심을 연결한 선을 x 축으로 하고, 그 사이의 거리를 d , 지면으로부터 중심까지 높이를 h 라 하면, 송신 및 수신 안테나 중심의 좌표는 각각 $(0, 0, h)$ 및 $(d, 0, h)$ 가 된다. 안테나 정면에서 보았을 때 송신안테나의 가로길이 $2h$, 세로

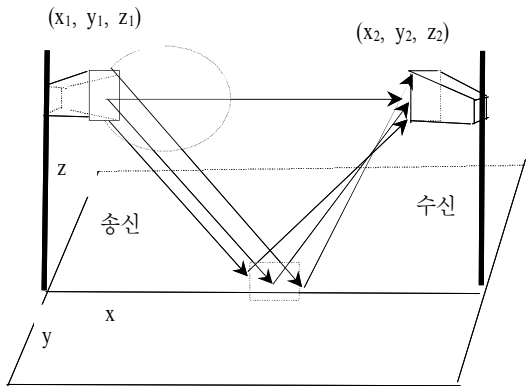


그림 7. 혼 안테나의 반사파
Fig. 7. Reflected waves for horn.

길이를 $2l_z$ 라 하고, 수신 안테나의 가로 및 세로 길이를 각각 $2L_y$ 및 $2L_z$ 라 하자. 송신 및 수신 혼 안테나 모서리의 좌표는 $(0, \pm l_y, h \pm l_z)$, $(d, \pm L_y, h \pm L_z)$ 이 된다. 페르마의 원리로부터 수신 안테나에 포획되는 반사파의 최단 경로와 최장 경로, 송신 및 수신 안테나의 중심과 중심을 통과하는 경로는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} d_{\min} &= \sqrt{d^2 + (2h - L_z + l_z)^2} \\ d_{\max} &= \sqrt{d^2 + (L_y + l_y)^2 + (2h + L_z + l_z)^2} \\ d_{\text{center}} &= \sqrt{d^2 + 4h^2} \end{aligned} \quad (7)$$

또한 반사되는 바닥면의 위치 좌표는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} &\left(\frac{h - l_z}{2h - l_z + L_z} \sqrt{d^2 + (l_y - L_y)^2}, \pm l_y, 0 \right) \\ &\left(\frac{h + l_z}{2h + l_z - L_z} \sqrt{d^2 + (l_y - L_y)^2}, \pm l_y, 0 \right) \end{aligned} \quad (8)$$

반사파는 식 (8)의 4개의 꼭지점을 잇는 바닥면의 사각형 내에서 반사되어 수신 안테나에 포획된다. 같은 크기의 안테나를 측정한다면 가로 길이(y축 방향)는 변화가 없지만 세로길이(z축 방향)는 $2l_z/d/2h$ 로 변화한다. 안테나 사이의 거리 d 와 송신 및 그 이미지 안테나 사이의 높이 차 $2h$ 와의 비율만큼 개구면 면적에 대해 바닥의 반사 면적이 변화한다. 본 논문에서 사용한 더블리지 혼 안테나의 크기는 24.2 cm×14.2 cm이다. 수신 안테나에서 감지되는 반사 위치의 면적 및 반사파의 최소와 최대 경로 그리고 안테나 중심과 중심을 지나는 경로 길이는 식 (7)과 (8)로부터 표 4에서 계산하였다. 3-2-2절의 그림 6들은 안테나의 중심 사이의 경로를 가정하고 측정된 데이터들이다. 반사파 신호는 피크에서 도달 시간을 측정하였다. 반사파 중에 수신 안테나에 가장 먼저 도달하는 신호는 표 4에서 최소경로를 택하는 파가 될 것이며, 중심경로와는 그 다음에 도달할 것이다. 안테나 높이 5 m에서는 최소경로와 중심경로 차가 10 cm이고, 9 m에서는 12 cm이다. 시간으로는 각각 0.33 ns 및 0.41 ns이다. 혼 안테나의 유효단면적은 일반적으로 물리적인 단면적보다 작기 때문에^[8] 중심경로와 최소경로 사이의 시간차는 실제로 더 작아진다. 이 차이는 그림 6에서 반사파의 피크와 반사

표 4. 반사면 면적 및 반사파 경로

Table 4. Area of reflected surface and path of reflected wave.

높이 (m)	반사 면적 (cm×cm)	최소 경로 (m)	중심 경로 (m)	최대 경로 (m)
5 m	24.2×14.2	14.04	14.14	14.24
6 m	24.2×11.8	15.51	15.62	15.73
7 m	24.2×10.1	17.09	17.20	17.32
8 m	24.2×8.8	18.75	18.87	18.99
9 m	24.2×7.8	20.47	20.59	20.72

파 신호가 시작되는 위치 오차 정도이기 때문에, 그림 7에서 중심경로의 한 지점의 반사만을 고려하는 것으로도 충분하다.

4-2 반사파 추적

안테나 높이가 1 m일 때 반사파(안테나 중심 경로를 지나는)와 직접파의 경로차 $d_2 - d_1 = 0.2$ m, 시간으로 0.67 ns이다. 그림 6에서 그래프의 한 칸은 11 ns로 그림 6(a)에서 반사파는 직접파의 응답폭 속에 묻혀 있으며, 직접파로부터 7 ns 떨어진 원안의 신호는 반사파가 될 수가 없다. 그림 6의 (b)에서 직접파의 피크로부터 약 3 ns에서 신호가 처음으로 분리됨을 볼 수 있다. 반사파와 직접파의 이론적인 경로차, 피크신호와 네모 안의 신호를 실측한 경로차는 표 5에서 볼 수 있다. 이것으로 그림 6(b)에서 분리되어 점점 오른쪽으로 멀어지는 네모 안의 신호는 반사파로 분석된다.

표 5. 반사파와 직접파의 경로의 이론 및 실측값

Table 5. Path difference between reflected and direct wave.

높이(m)	이론값(m, ns)	측정값(m, ns)
2	0.77, 2.57	0.72, 2.40
3	1.66, 5.53	1.60, 5.33
4	2.81, 9.37	2.80, 9.33
5	4.14, 13.80	4.17, 13.90
6	5.62, 18.73	5.53, 18.43
7	7.20, 24.00	7.21, 24.03
8	8.87, 29.57	8.89, 29.63
9	10.59, 35.30	10.57, 35.23

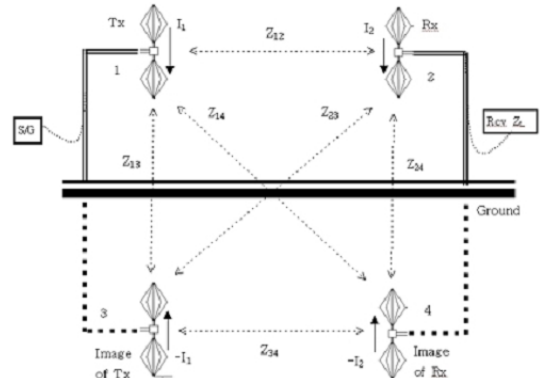


그림 8. 금속면 시험장에서 상호 임피던스 영향
Fig. 8. Mutual impedance on metal ground.

4-3 상호 임피던스 영향

도체면 위에서는 안테나-안테나, 안테나-도체면의 상호작용이 존재한다. 이 관계는 그림 8에서 나타내었으며, 상호 임피던스를 Z_{lm} 이라 하면 ($l, m=1, 2, 3, 4$) 다음과 같은 2-포트 모델^[7]로 분석된다.

$$\begin{aligned} V_1 &= (Z_{11} - Z_{13})I_1 + (Z_{12} - Z_{14})I_2 \\ V_2 &= -Z_L I_2 = (Z_{12} - Z_{14})I_1 + (Z_{22} - Z_{24})I_2 \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 Z_L 은 수신측의 입력 임피던스이다.

안테나-안테나 및 안테나-도체의 상호 임피던스는 송신 및 수신 안테나에 전류를 유도하며, 이 전류가 전자파의 재복사를 야기한다. 먼저, 송신 안테나에 전류 I 를 급전하면 송신안테나 1과 전류 $-I$ 인 영상 안테나 3의 복사에 의해 수신 안테나 2에 전자기파가 전달되며, 이것은 4-1절에서 직접파(경로 d_1)와 반사파(경로 d_2)에 해당한다. 2차적으로 송신 안테나의 영상 3에서 복사한 전자파가 송신안테나 1에 전류를 유도하여 그 전류에 의한 전자파가 수신 안테나 3으로 전달(경로 $2h+d_1$)된다. 그런 후 수신 안테나의 영상 4에 유도된 전류에 의해 복사되는 전자기파가 다시 수신 안테나 3에 전달(경로 d_1+2h)된다. 이러한 효과는 순차적으로 3차, 4차 ... n차로 무수히 이어지지만, 이는 시간 영역에서 관찰하였을 때, 유도된 파들이 수신 안테나에 시간의 순서로 도달함을 의미한다. 즉, 직접파는 d_1/c 초, 반사파는 d_2/c 초, 송신측 영상 안테나에 의하여 송신안테나에 유도되어 재복사하는 파는 $(2h+d_1)/c$ 초, 수신측 영상 안테나에서

복사하여 수신 안테나에 도달하는 파는 $(d_1+2h)/c$ 초로 시간적으로 나열되어 수신 안테나에 도달할 것이다. 이들 시간의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{d_1}{c} < \frac{d_2}{c} = \frac{\sqrt{d_1^2 + 4h^2}}{c} < \frac{d_1 + 2h}{c} \quad (10)$$

상호 임피던스에 의해 재복사되는 유도파들은 바닥 반사파보다 더 늦게 수신 안테나에 도달한다. 그러므로 상호 임피던스 유도에 의한 복사파들은 3-2-2 절의 그림 6(e)에서 (i)까지 네모 안의 바닥 반사파보다 더 오른쪽에 위치하기 때문에 게이팅 과정에서 제외시킬 수 있다. 비록 금속면위에서 상호 임피던스 작용이 있을지라도 4-4절의 그림 10의 Gate 1을 통하여 유도 복사 전기장을 제외하고, 순수 직접파만을 추출할 수가 있기 때문에 이렇게 측정된 전송 계수 S_{21} 은 두 안테나 사이의 자유 공간 응답이 된다.

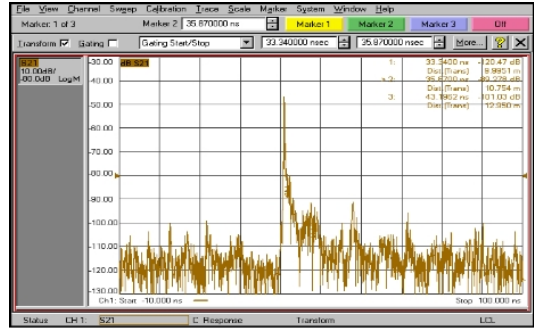
4.4 안테나 반응 시간과 게이팅 범위

3-2-2절의 그림 6의 (a)에서 (i)까지 위치가 변하지 않고, 그 세기도 일정하게 유지되는 원 안의 신호는 더블리지 혼테나의 응답반응이다. 그림 6의 (e)에서 (i)까지 원안의 신호와 잡음 레벨을 비교할 때 최대 잡음 레벨보다 5 dB에서 10 dB 정도 높다. 그림 6의 (f)는 안테나 AB 쌍의 6 m 높이에서 데이터이고, BC 및 CA 쌍에 대한 같은 높이에서 데이터는 그림 9의 (a) 및 (b)에서 볼 수 있다.

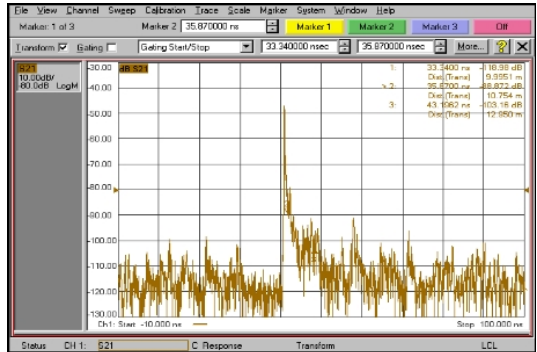
그림 9의 (a) 및 (b)는 응답의 모양이 거의 유사하며, 그림 6(f)와는 약간의 차이가 있을지언정 그 원안의 신호는 그림 9의 피크 바로 옆에 있는 신호와 비슷하다. 그러므로 그림 6 (f)의 원안의 신호는 직접파의 응답임으로 결론 내릴 수 있다. 그런 이유로 그림 10의 Gate 2와 같이 게이팅을 하여 그 신호를 제외해서는 아니 되며 Gate 1과 같이 게이팅을 하여야 한다.

4.5 주파수 영역에서 신호 비교

그림 11(a)는 5 m 높이에서 반사파가 그대로 포획된 주파수 영역의 S_{21} 이며, 그림 11(b)는 시간 영역의 게이팅을 통하여 반사파가 제거된 주파수 영역의 S_{21} 이다. 그림 11에서 보는 바와 같이 반사파가 제거된 주파수 영역에서 신호 응답은 리플이 없는 매끄�



(a) 6 m 높이에서 BC 쌍의 시간 영역 응답
(a) Time domain response for pair BC at height 6 m



(b) 6 m 높이에서 CA 쌍의 시간 영역 응답
(b) Time domain response for pair CA at height 6 m

그림 9. 6 m 높이에서 안테나 쌍 BC 및 CA 시간 응답
Fig. 9. Response for pairs BC and CA.

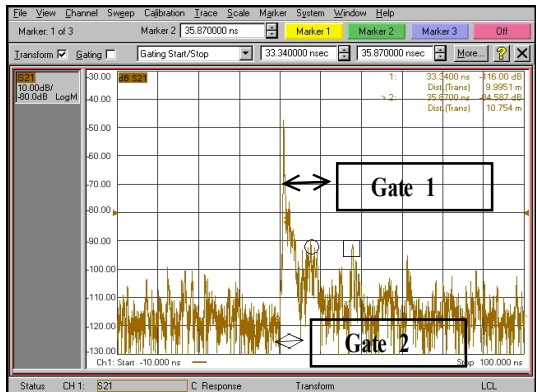
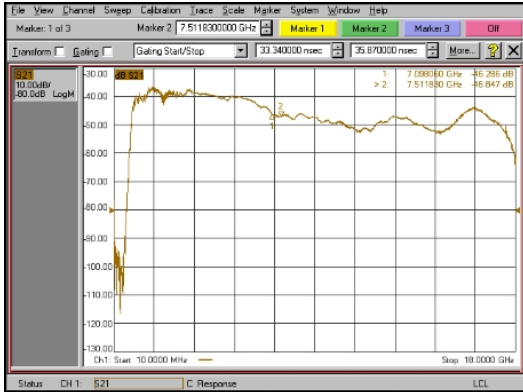
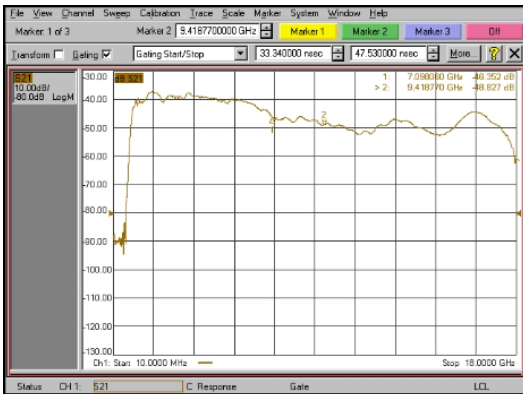


그림 10. 올바른 게이팅의 범위
Fig. 10. Correct time gating.

러운 곡선을 이룬다. 지향성이 강한 혼 안테나 임에도 불구하고, 리플들은 크기는 1 dB 이상의 차이를 보인다. 특히, 1~3 GHz에서 다소 큰 리플들이 보이는데, 그것은 낮은 주파수의 파가 바닥 반사파의 영



(a) 반사파가 포함된 주파수 영역 응답
(a) Response of frequency domain including the reflected wave



(b) 반사파가 제거된 주파수 영역 응답
(b) Response of frequency domain excluding the reflected wave

그림 11 반사파 제거 전후의 주파수 응답
Fig. 11. Frequency response before and after removal of reflected wave.

향을 더 심하게 받는다는 것을 의미한다.

V. 안테나 이득 산출

5-1 자유 공간 안테나 이득

다음과 같은 Friis 전송방정식은 자유 공간에 놓인 두 안테나 사이의 관계식이다.

$$G_T G_R = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \frac{P_R}{P_T} \quad (11)$$

여기서, G_T 는 전송안테나의 이득, G_R 수신 안테나의 이득, P_T 는 전송 전력, P_R 는 수신 전력, P_R/P_T 는 안테

표 6. 시간 영역에서 측정된 자유 공간 안테나 이득 (5 m, 6 m, 7 m 높이)

Table 6. Free space antenna gain measured in time domain (antenna height : 5 m, 6 m, 7 m).

Freq. (GHz)	5 m Gain(dB)	6 m Gain(dB)	7 m Gain(dB)
1	5.72	5.87	5.65
2	10.19	10.16	10.18
3	11.50	11.56	11.56
4	12.72	12.69	12.68
5	12.89	12.94	12.94
6	13.76	13.76	13.78
7	12.38	12.38	12.42
8	11.57	11.54	11.57
9	12.04	12.03	12.10
10	11.43	11.36	11.42
11	10.29	10.33	10.34
12	12.63	12.56	12.58
13	13.77	13.73	13.74
14	12.49	12.56	12.53
15	12.18	12.29	12.25
16	15.76	15.79	15.70
17	14.50	14.51	14.54
18	8.95	9.12	9.17

나 사이의 자유 공간 삽입 손실, d 는 안테나 사이의 거리, λ 는 파장이다.

지면으로부터 5 m, 6 m, 7 m에서 3개의 안테나 쌍 (A, B), (B, C), (C, A)에 대하여 시간 영역에서 그림 6과 같이 반사파를 추적하여 게이팅으로 제거한 후 그림 11(b)의 주파수 영역 데이터를 얻어서 식 (6)로부터 자유 공간 안테나 이득을 계산한다. 그 결과는 표 6에서 제시된다. 5 m, 6 m, 7 m 각각의 높이에서 측정된 안테나 이득값은 잘 일치함을 볼 수 있다.

5-2 표준시험장법과 비교

ANSI C63.5는 야외시험장에서 혼 안테나의 교정 절차^[6]에 대하여 규정하고 있다. 기본적인 방정식은 다음과 같다.

$$AF_T AF_R = \frac{f_M E_D^{\max}}{279.1} A_{RT} \quad (12)$$

여기서, AF_T 는 전송안테나의 안테나 인자, AF_R 는 수신 안테나의 안테나 인자, f_M 은 MHz 단위의 주파수, A_{RT} 는 시험장 감쇠량이며, E_D^{max} 는 안테나 사이의 수평거리가 d 일 때 혼 안테나에 대하여 다음과 같이 정의^[6]된다.

$$E_D^{max} = 20 \log(\sqrt{49.2} d) \quad (13)$$

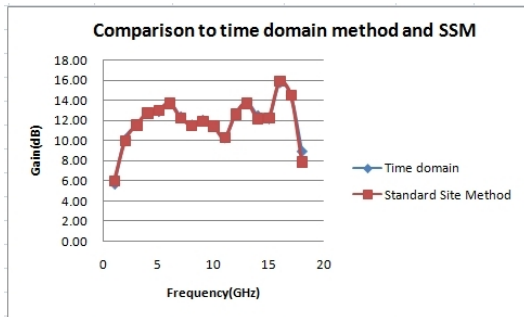
야외시험장에서 안테나 높이 2 m, 그 사이의 수평 거리 3 m로 측정하였다. 표준시험장법에 의해 측정 한 값과 시간 영역에서 5 m 높이로 측정한 값을 그림 12의 그래프에서 비교하였다. 대부분의 측정값은 0.3 dB의 좋은 일치를 보여주었지만 18 GHz에서 1 dB 이상의 차이를 보였다. 그것은 측정시 안테나를 설치하는데 있어서 시험장으로부터 5 m 높이에서 혼 안테나의 날카로운 주빔을 맞추는데 오차가 발생 하고, 3쌍의 안테나를 배열하면서 오차가 누적된 결

과이며, 한편, 표준시험장법의 3 m 측정 거리는 18 GHz에 대해 원거리장 요건을 만족하지 못한 것에 기인한다고 판단된다.

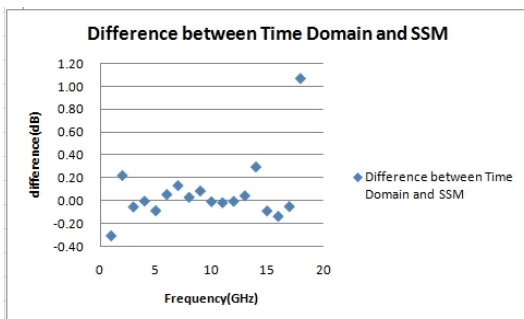
VI. 맺음말

그동안 전자파의 시간 영역 측정은 디바이스의 불연속점을 찾을 목적으로 반사 계수 S_{11} 측정에 중 점을 두었다. 이는 케이블 및 디바이스 내부 만을 들여다 볼 수 있었다. 반면에 전송 계수 S_{21} 은 디바이스의 내부뿐만 아니라, 안테나를 떠난 전자파의 공간에서의 전송 특성을 보여줄 수 있다. 컴퓨터의 빠른 계산 능력과 결합한 백터 네트워크 분석기는 S_{21} 의 시간 영역 들여다보기를 가능하게 하였다. 본 연구에서는 이를 응용하여 직접파와 반사파를 시간적으로 구분 추적함으로써 자유 공간 안테나 이득을 측정하였다. 이는 주파수 영역에서 자유 공간 안테나 이득을 측정하는 것보다 효과적이다.

본 논문에서 1 ~ 18 GHz 대역 더블리지 혼 안테나에 대하여 금속 접지 평면의 야외시험장에서 안테나 사이의 수평 거리 10 m를 유지하고, 안테나 높이 1 m에서 9 m까지 가변시키면서 직접파와 반사파의 경로차를 바꾸어가며 시간 영역에서 반사파를 추적하였다. 사용된 안테나의 반응시간이 약 9 ns라는 것을 분석하였고, 직접파와 반사파 사이의 분리거리가 최소한 9 ns 이상, 거리로서 2.7 m 이상 되어야 함을 논의하였다. 5 m, 6 m, 7 m 높이에서 자유 공간 안테나 삽입 손실을 추출하여 각각의 높이에서 안테나 이득을 산출하였다. 각 높이에서 측정된 자유 공간 안테나 이득은 서로 잘 일치하였다. 또한 비교 검토를 위해 ANSI C63.5의 표준시험장법으로 이득을 측정하였다. 결과는 18 GHz를 제외하고 모든 대역에서 좋은 일치를 보였다. 18 GHz에서의 차이 만으로 시간 영역의 안테나 이득 측정이라는 근본 취지를 훼손하는 것은 아니다. 본 연구는 시간 영역에서 안테나 측정 및 교정의 새로운 방식을 제안하는 것이며, 챔버에서 안테나 측정을 야외시험장으로 대체할 수 있는 기술에 관한 논의이다. 향후 바이코니컬 안테나, 대수주기 안테나 등 혼 안테나보다 주파수가 낮은 안테나를 대상으로 시간 영역에서 안테나 이득을 측정하기 위한 연구를 더 진행할 것이다.



(a) 표준시험장법과의 상호 비교 결과
(a) Comparisons between time domain measurement and SSM



(b) 표준시험장법과의 측정값 차이
(b) Differences between time domain measurement and SSM

그림 12. 표준시험장법과 상호비교 결과
Fig. 12. Comparison to standare site method.

참 고 문 헌

[1] Albert A. Smith, "Standard site method for determining antenna factors", *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, vol. EMC-24, no. 3, pp. 316-322, Aug. 1982.

[2] Jungkuy Park, Dongchan Jeong, Hun Youn, Myoungwon Seo, Daehoon Yu, and Jaeman Ryoo. "3-Antenna height scanning average method of EMI antenna calibration", *2009 IEEE EMC Symposium*, Aug. 2009.

[3] Dennis Camell, Robert T. Johnk, David Novotny, and Chriss Grosvenor, "Free-space antenna factors through the use of time-domain signal processing", *2007 IEEE EMC Symposium*, Aug. 2007.

[4] Agieint, "Agilent time domain analysis using a network analyzer", *Application Note 1287-12*.

[5] H. T. Friis, "A note a simple transmission formula", *Proc IRE.*, pp. 254-256, May 1946.

[6] ANSI C63.5-2006 American National Standard for Electromagnetic Compatibility- Radiated Emission Measurement in Electromagnetic interference(EMI) Control - Calibration of Antenna(9 kHz~40 GHz).

[7] Constantine A. Balanis, *Antenna Theory : Analysis and Design*, pp. 296-303, Jonh Wiley & Sons, 1982.

[8] R. E. Collin, *Antennas and Radiowave Propagation*, p. 293, McGraw-Hill Series in Electrical Engineering, 1985.

박 정 규



1990년 2월: 고려대학교 물리학과 (이학사)
 1996년 2월: 고려대학교 물리학과 (이학석사)
 1996년 9월~현재: 국립전파연구원 [주 관심분야] 안테나 교정 및 측정, EMC 측정 및 불확도

김 우 년



1997년 2월: 안동대학교 물리학과 (이학사)
 1997년 12월~현재: 국립전파연구원 [주 관심분야] 안테나 교정 및 측정전자파장해 및 내성 측정 등