

# 반사 펄스의 주파수 해석을 이용한 광대역 3.5 mm 동축형 단일 포트 벡터 회로망 분석법

## 3.5 mm Coaxial One Port Vector Network Analysis Using Time Domain Reflectometry

이동준 · 권재용 · 소준호\* · 강노원

Dong-Joon Lee · Jae-Yong Kwon · Joonho So\* · No-Weon Kang

### 요 약

본 논문에서는 샘플링 오실로스코프를 이용한 시간 영역의 해석을 통해 초고주파 소자 및 안테나의 반사 계수를 평가하는 방법을 소개한다. 20 GHz 급의 펄스 입력 신호에 대한 반사 신호를 측정 후, 이를 푸리에 변환하여 반사 계수를 추출하였다. 초고주파 반사파 회로망의 보정에 필요한 3가지 오차 계수들은 3.5 mm calibration kit을 이용하여 유도하였다. 또한, 반사파 측정을 위하여 결합기를 사용한 경우의 오차 계수를 유도하고, 이를 적용하여 얻은 반사 계수와 벡터 회로망 분석기로 측정된 결과를 비교하였다.

### Abstract

This paper presents a method to measure reflection coefficients of microwave devices or antennas based on time domain analysis with sampling oscilloscopes. The reflection coefficients were extracted by the Fourier transformation of echo pulses from devices with respect to the 20 GHz incident pulse signals. The three-error terms, which are commonly used for the correction of a microwave network, were determined using a 3.5 mm calibration kit. In addition, a modified error-correction model associated with a directional coupler for reflection coefficient measurements is introduced. The results were compared with those of measured with a commercial vector network analyzer.

Key words : Oscilloscope, Reflection Coefficient Measurement, Vector Network Analyzer

### I. 서 론

초고주파 소자나 안테나의 반사 계수 측정에는 주파수 영역 해석 장비인 벡터 회로망 분석기(Vector Network Analyzer: 이하 VNA)를 통상적으로 이용한다. VNA는 진폭과 위상 정보를 동시에 가지는 벡터 신호를 분석하기 위하여 헤테로다인 복조 방식을 사용하므로 장비 내부에 측정하고자 하는 초고주파 소

자보다 높은 주파수의 발진기를 보통 2개 이상 필요로 하며, 연속 발진 주파수 sweep에 의한 측정 방식이기 때문에 산란 계수 같은 주파수 영역의 복소 신호 측정에 적합한 고가의 장비이다.

한편, 광대역 펄스를 신호원(signal source)으로 사용하는 시간 영역 측정은 선로의 불연속면에서 반사되는 신호의 생성 시간과 상대적인 크기/위상/파형을 관찰할 수 있으므로 직관적으로 해당 초고주파

한국표준과학연구원 전자파센터(Center for Electromagnetic Wave, Korea Research Institute of Standards and Science)

\*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received April 20, 2012 ; Revised July 5, 2012 ; Accepted July 16, 2012. (ID No. 20120420-048)

· Corresponding Author : Dong-Joon Lee (e-mail : dongjoonlee@kriss.re.kr)

소자의 반사 특성을 분석할 수 있다.

각각의 시간-주파수 영역 해석은 이처럼 고유의 장점이 있기 때문에, 주로 상용의 VNA나 TDR(Time Domain Reflectometry) 기능을 지원하는 모듈을 사용하여 해석하고자 하는 영역에서 실측하여 반사 특성을 분석한다.

대부분의 고급 VNA와 TDR 장비는 각각 실측한 결과를 수치적으로 변환하여 서로 반대의 영역(VNA-시간 해석, TDR-주파수 해석)을 해석하는 기능을 포함하고 있다. 하지만 이들의 경우는 영역 변환하는 과정을 거침으로 해서 문제점을 가지게 된다. 예를 들어 VNA는 측정된 산란 계수로부터 iFFT(inverse-Fast Fourier Transformation)를 통해 시간 영역의 응답을 얻는 것으로, 변환에 사용되는 제한된 범위의 주파수 정보로 인한 여러 가지 왜곡을 최소화하기 위하여 ‘Windowing’, ‘Gating’, ‘Masking’ 등의 후처리를 한다<sup>[1]</sup>. 현실적으로는 이와 같은 후처리에도 불구하고 완전한 시간 영역의 신호를 추출하기 어려워 오실로스코프를 이용한 시간 영역 신호의 측정을 최선의 방법으로 여겨왔다.

본 논문에서는, 상용 벡터 회로망 분석기나 초고속 반사파 측정 모듈 등에 의존하지 않고도, 이와 대칭되는 개념의 광대역 펄스 신호원과 이를 시간 영역 상에서 관찰할 수 있는 샘플링 오실로스코프(Sampling Oscilloscope: 이하 SOS) 그리고 하나의 광대역 결합기만을 이용하여 주파수 영역의 반사 계수까지 측정할 수 있는 매우 간단하고 실용적인 모델 및 해석 방법을 표준 부정합기, 대역 통과기, 패치 안테나 등의 다양한 소자 측정 과정을 통하여 제시한다.

## II. 단일 포트 반사 계수 측정 시스템

반사 계수 측정은 회로망 분석에서 가장 중요한 요소의 하나이다. 일반적으로 단일 포트 회로망 분석에서 피측정 소자를 결합면에 연결하면 재질, 치수 등의 차이에 의한 부정합으로 반사가 생긴다. 회로망 분석에서 위와 같은 요소를 효율적으로 정의하고 제거하는 것은 매우 중요하므로, 본 논문에서는 그림 1과 같은 3항 오차 모델을 적용한다<sup>[1]~[3]</sup>.

그림 1과 같이 단일 포트에 가상의 오차면(error plane)을 설정하고, directivity(= $e_{00}$ ), port match(= $e_{11}$ ),

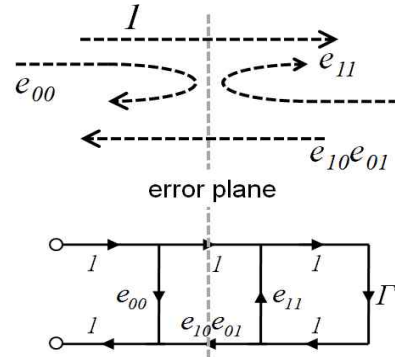


그림 1. 단일 포트 교정용 3항 오차 모델  
Fig. 1. Three-term error model for one-port calibration.

reflection tracking(= $e_{10}e_{01}$ )과 같이 3개의 오차항을 정의한다.

값을 이미 알고 있는 기준 반사 계수와 오차를 포함한 실측한 반사 계수를  $\Gamma_i$  와  $\Gamma_m(i=1, 2, 3)$ 로 정의하면, 각각의 오차항은 다음의 행렬식 (1)로 표현된다(이때  $\Delta_e \equiv e_{00}e_{11} \cdot e_{10}e_{01}$ 이다).

$$\begin{bmatrix} e_{00} \\ e_{11} \\ \Delta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Gamma_1 \Gamma_{m1} & -\Gamma_1 \\ 1 & \Gamma_2 \Gamma_{m2} & -\Gamma_2 \\ 1 & \Gamma_3 \Gamma_{m3} & -\Gamma_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Gamma_{m1} \\ \Gamma_{m2} \\ \Gamma_{m3} \end{bmatrix} \quad (1)$$

오차항이 정의되면 실측한 반사 계수로부터 식 (2)에 의해 쉽게 보정된 반사 계수를 구할 수 있다.

$$\Gamma = \frac{\Gamma_m - e_{00}}{\Gamma_m e_{11} - \Delta_e} \quad (2)$$

## III. 시간 영역 반사 계수 측정 시스템

그림 2는 반사 계수를 측정하기 위하여 3항 오차 모델을 적용한 시간 영역 반사파 해석 방법을 보인다. 펄스가 인가되는 입력 포트와 결합기는 입력 신호가 바로 샘플링 오실로스코프(Tektronix: TDS8200)로 입사되지 않도록 결합기 연결 방향을 주의하고, 결합기의 나머지 출력단에 3.5 mm 동축선을 연결한다. 이때 사용된 결합기는 6~26.5 GHz 광대역 통과 특성과 10 dB의 결합비를 갖는 Narda 사의 4247B-10이다(보다 광대역 특성이 요구되는 경우, 이를 지원하는 결합기가 요구된다). 입력 신호는 동축선의 종단 포트에서 반사되고, 그 신호는 다시 결합기를 통하여 측정 포트(test port)로 입사되어 측정된다(실선 화살표 참조).

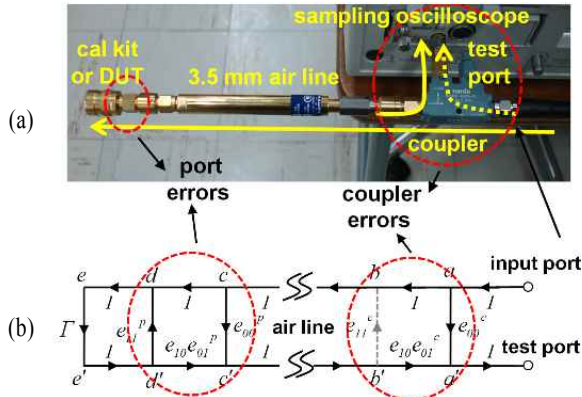


그림 2. 오실로스코프를 이용한 시간 영역 반사 계수 측정 시스템 : (a) 설정 환경, (b) 오차 보정 회로망 모델

Fig. 2. Time domain reflection coefficient measurement system with oscilloscope : (a) configuration, (b) error-correction model.

위와 같이 반사 계수 측정 시스템에서는 일반적으로 입사-반사 신호의 분리를 위해 그림 2처럼 결합기나 서큘레이터를 사용하게 되므로, 이들 소자에 의한 오차항이 추가된다. 상용 계측기의 경우, 이 오차항들은 사전에 평가되어 시스템 내에 보정된 값이 내장된다. 위와 같이 자체 구현된 시간 영역 해석 시스템에서는 별도로 결합기의 영향을 고려하여야 하는 어려움이 있지만, 신호 선택(gating)을 통하여 불필요한 오차항을 크게 줄일 수 있는 장점이 있다. 예를 들어 그림 2의 결합기와 종단 포트 사이의 길이 150 mm의 3.5 mm 동축 연장 air line 선로는 결합기에 의한 영향과 종단 포트에 의한 영향을 분리할 수 있도록 시간적으로 충분한 간격을 주므로 각각의 오차항(각각 위치자  $c$ 와  $p$ 로 표시)에 의한 반사 펄스를 직접 확인하고, 선택적으로 제거할 수 있다. 본 논문에서는 결합기에 의한 port match항(그림 2의 점선항  $e_{11}^c$ )을 제거한 해석을 다루기로 한다.

#### IV. 반사 펄스에 의한 오차항 결정

그림 2의 입력 포트에서 측정된 입사 펄스는 20 GHz 대역의 펄스 발생 장치로부터 생성되었다<sup>[4]</sup>. 펄스 발생 장치와 측정 시스템 간의 충분한 시간적인 분리를 위해 다소 긴 60 cm 길이의 3.5 mm 동축선으로 연결하였으며, 측정된 펄스는 그림 3에서 보인다. 입력 펄스의 주파수 특성은 시간 영역에서 실측된

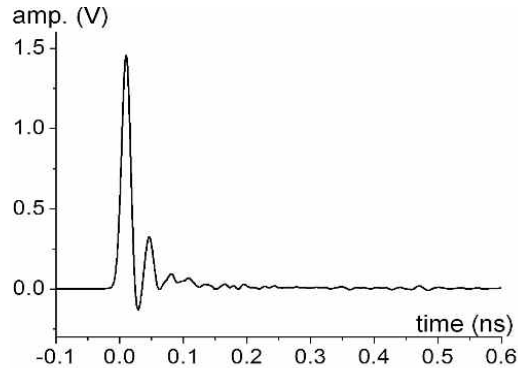


그림 3. 그림 2의 입력 포트에서의 입사 펄스  
Fig. 3. Incident pulse at input port in Fig. 2.

입사 펄스를 푸리에 변환하거나 상용 스펙트럼 분석기로 직접 측정할 수 있으며, 본 논문에 사용된 펄스 발생기에서 생성되는 신호의 주파수 특성은 참고문헌 [4]에서 보였다. 그림 3은 펄스 발생기의 펄스가 케이블을 통해 그림 2의 결합기에 입사되는 것이며, 연장 케이블에 의한 손실 때문에 20 GHz 미만의 대역폭을 갖는다.

3항 오차 모델에서 각 오차항을 결정하기 위해서는 최소 3개의 표준 반사 기준기가 필요하며, 본 측정에서는 Agilent Technology사의 85052B 3.5 mm calibration kit(이하 cal kit)의 female 개방, 단락, 종단을 이용하였다. 그림 4는 오차항을 유도하기 위하여 표준 반사 기준기를 장착하여 측정된 반사파로, 선로에 의한 시간 지연, cal kit 종류에 따른 위상 변화, 결합기 특성에 의한 진폭 변화 등을 보인다. 각각의 펄스열은 반사파의 발생 원인에 따라 크게 결합기, 기준기, 이차(coupler, standard, secondary) 반사 신호로

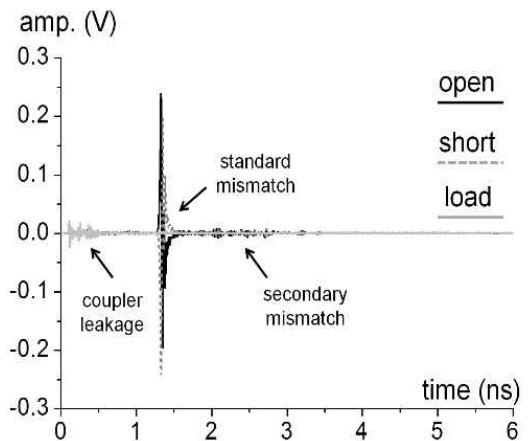


그림 4. Calibration kit에 의한 시스템의 반사 펄스  
Fig. 4. Reflection pulses due to calibration kit.

크게 세 가지의 부정합 반사파 그룹으로 분류되며, 150 mm의 연장 air line을 사용함으로써 nanosecond 스케일로 분리되었다. 이는 관측된 신호에서 필요시 특정 부분을 선택적으로 분리/제거할 수 있음을 의미한다.

그림 4의 펄스를 각 시간 영역별로 자세히 분석한 것이 그림 5에 나타나 있다. 그림 5(a)는 결합기의 불완전한 isolation, directivity 오차항  $e_{00}^c$ 으로 인해 관측되는 신호로 그림 2(b)의 input-a-a'-test 포트에 이어지는 경로를 통한 측정 신호이다. 이는 반사파라기보다는 결합기 고유의 leakage 특성에 의한 펄스 성분이기 때문에 표준 반사 기준의 종류에 무관하게 완전히 일치한다.

그림 5(b)는 동축선의 종단 포트에 개방, 단락, 종단의 표준 반사 기준기가 각각 장착되었을 때의 반사파로 개방의 경우 입사파와 반사파는 동위상으로, 단락의 경우 역위상으로 측정이 됨을 알 수 있다. 이는 그림 2(b)의 input-a-b-c-c'-b'-a'-test( $e_{00}^p$  포함), input-

a-b-c-d-e-e'-d'-c'-b'-a'-test( $\Gamma, e_{10}e_{01}^p$  포함), input-a-b-c-d-e-e'-d'-(d-e-e'-d')<sup>n</sup>차-c'-b'-a'-test( $\Gamma, e_{10}e_{01}^p, e_{11}^c$  포함,  $n=1, 2, 3, \dots$ ) 포트에 이어지는 경로들의 합으로 구성되는 측정 신호이다.

그림 5(c)는 반사파를 자세히 보인 것으로 반사표준기(개방, 단락)에 따른 위상 반전을 확인할 수 있다.

그림 5(d)는 결합기에 의한 오차항  $e_{11}^c$ 에 의해 다시 반사되어 전송 선로의 왕복 경로 b-c, c'-b'를 거쳐 ...c'-b'-a'-test 경로를 통해 검출되는 반사파들을 나타낸다.

그림 5(b)의 측정 신호가 반사 특성을 결정지우는 중요한 정보를 가지고 있으므로 그림 5(a)와 5(d)의 복잡한 신호는 필요에 따라 gating한다. 이 방법은 필요 없는 오차항을 줄일 수 있지만 줄어든 시간 영역 정보로 인해 푸리에 변환을 하면 신호 왜곡을 유발할 수 있으므로 적절한 시간의 gating이 매우 중요하다. 그림 5(d)는 결합기와 air line 간의 부정합에 의해 전송 선로를 2차례 이상 왕복하는 이차 반사항의

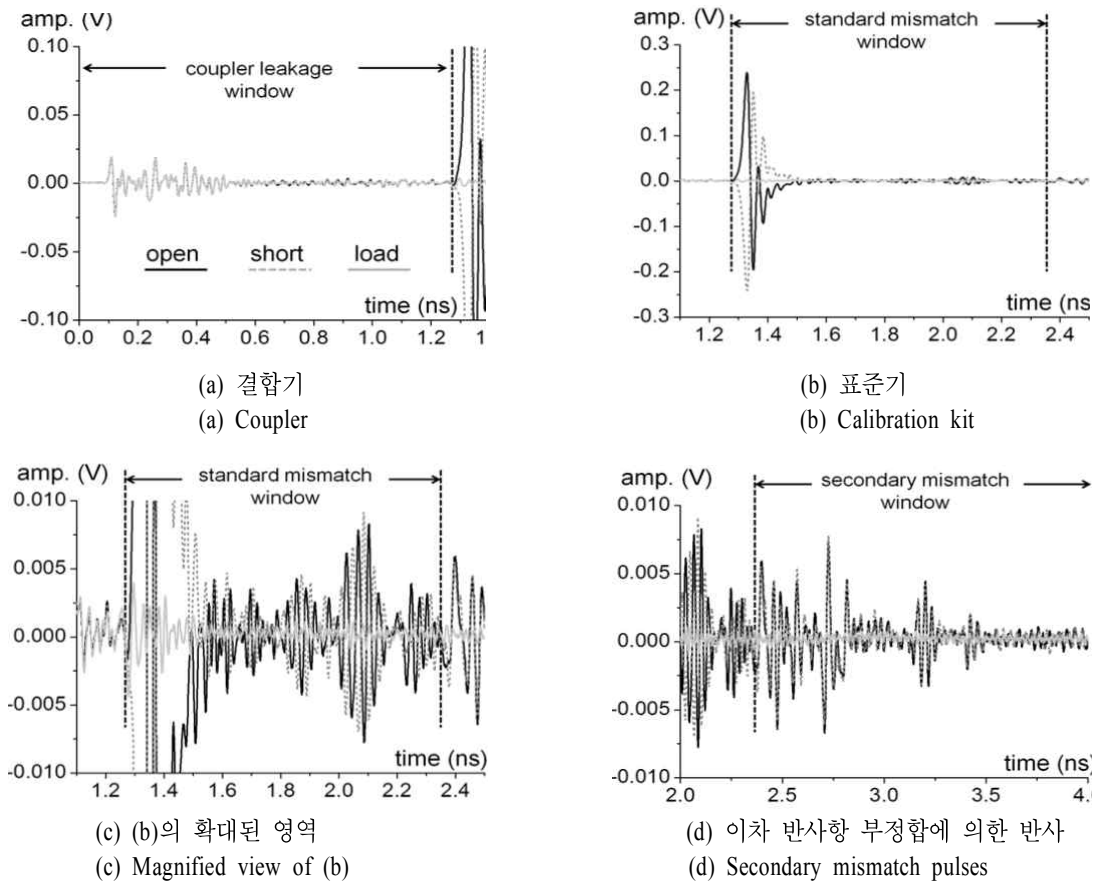


그림 5. 자세한 그림 4의 펄스  
Fig. 5. Detailed view of Fig. 4.

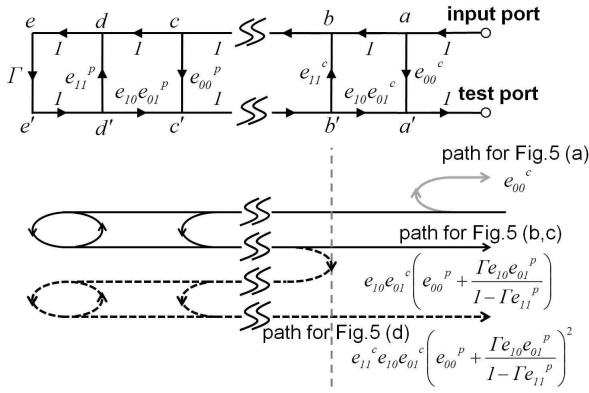


그림 6. 오차 보정 회로망 모델에서 주요 반사 경로의 신호흐름도

Fig. 6. Signal flow graph for major reflection path in terms of error-correction model.

부정합을 보여주는데  $e_{11}^c$ 의 오차항에 해당한다.

그림 5의 3가지 반사 경로는 air line을 지나는 횡수에 따라 구분되며, 신호 흐름도를 통해 분석한 각각의 반사 경로와 유도된 수식을 그림 6에 나타내었다.

## V. 반사 펄스에 의한 소자 분석

시간 영역 해석을 통한 반사 계수 측정법을 검증하기 위하여 표준 부정합 종단기, 복잡한 공진 구조를 가지는 주파수 대역 통과 필터 그리고 패치 안테나의 신호 응답을 측정하였다.

### 5-1 부정합기 해석

그림 7은 VSWR이 각각 1.1과 2.0인 표준 부정합 종단기(mismatch load)에 의한 반사파로 부정합 종단기에서 반사가 일어나기 전의 신호는 동일하다. 이

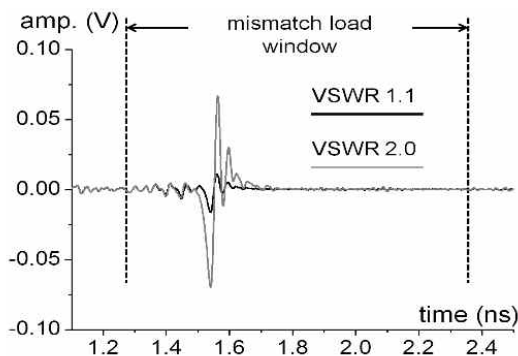


그림 7. 부정합 종단기에 의한 시스템의 반사 펄스  
Fig. 7. Reflection pulses due to mismatch loads and system errors.

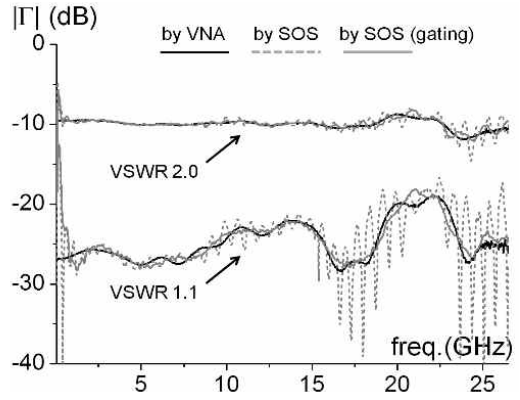


그림 8. 부정합 종단기의 반사 계수 측정 비교  
Fig. 8. Comparison of reflection coefficients for mismatch loads.

후 부정합기의 부정합 정도에 따라 반사파가 크게 상이하며, 이들은 종단 포트에 대한 3항의 오차 성분( $e_{00}^p$ ,  $e_{11}^p$ ,  $e_{10}e_{01}^p$ )을 포함하고 있다.

IV절에서 3개의 오차항을 구하기 위하여 동축선의 종단 포트에 개방, 단락, 종단의 표준 반사 기준기를 장착하여 각각의 반사 펄스를 얻은 후에 푸리에 변환하였다.

이 값들을 식 (1)의  $\Gamma_{mi}(i=1, 2, 3)$ 로 사용하고,  $\Gamma_i$ 는 각각 이상적인 개방, 단락, 종단에 해당하는  $1 \angle 0^\circ$ ,  $1 \angle 180^\circ$ ,  $0 \angle 0^\circ$ 로 대입할 수 있으며, 보다 정밀한 측정을 위해서는 Agilent사에서 보급되는 해당 모델의 cal kit의 data를 주파수 배열로 사용해야 한다. Cal kit을 대신하여 정확히 반사 계수를 알고 있는 최소 3개의 부정합 종단기를 사용해도 무방하다. 오차항의 불확도를 줄이기 위해서는 부정합 종단기들의 반사 계수 차이가 클수록 좋으며, 그렇지 않은 경우는 3개 이상의 종단기를 사용하여 결정된 오차들의 평균을 취한다.

오차항이 정해지면 그림 7의 반사 펄스를 푸리에 변환하여 그 배열요소마다 식 (2)를 이용하여 보정한다. 그림 8은 0 ns에서 6 ns까지의 전체 측정 신호를 이용하여 해석한 것과, 반사파 이전 영역을 gating 한 부분 신호를 이용한 해석 결과를 상용 VNA로 계측한 광대역 반사 계수와 비교하였다. 상대적으로 작은 부정합인 VSWR이 1.1의 경우에는 반사파의 크기가 그림 5(a)의 결합기 leakage 성분의 크기와 엇비슷하므로 gating 처리를 하지 않으면 높은 주파수에서 큰 간섭형 편차를 갖게 된다. 결합기가 통과시

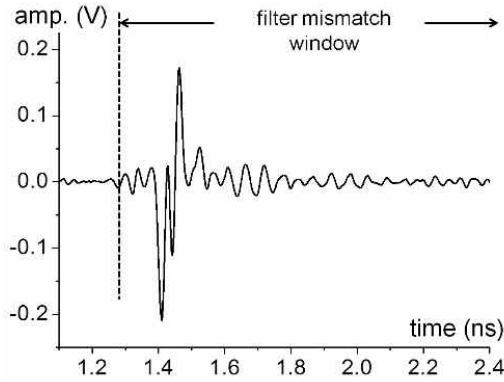


그림 9. 필터에 의한 시스템의 반사 펄스  
Fig. 9. Reflection pulses due to filter and system errors.

키는 하한 통과 주파수보다 낮은 대역과 입력 펄스 신호의 크기가 작은 20 GHz 이상의 주파수 대역을 제외하고 gating 후 VNA 측정 결과와 잘 일치한다.

### 5-2 대역 통과기 해석

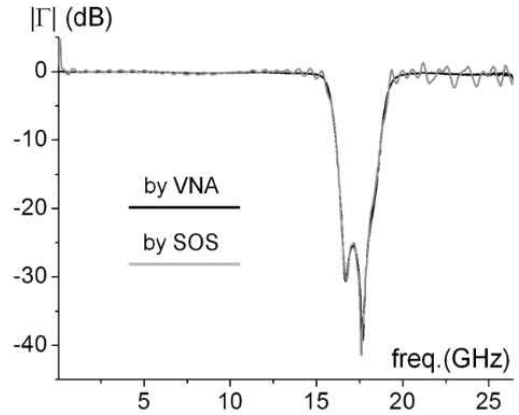
그림 9는 공진 특성을 가지는 소자에 대한 평가를 위해 대역 통과 필터를 분석한 것이다.

상술한 시간 영역의 SOS로 측정된 필터의 시간 영역 데이터를 상용 VNA로 측정된 결과와 그림 10에서 보였다. 중심 통과 주파수는 필터의 사양대로 17.3 GHz에서 나타나고, 이 대역에서의 급격한 위상 변화는 공진의 정도를 나타낸다. 그 외의 대역은 비공진 대역에서 예상되는 선형적인 위상 변화를 보였다. 이러한 선형성은 20 GHz 이하의 대역에서 비교적 상용 계측기로 측정된 결과와 비교적 일치함을 보였다.

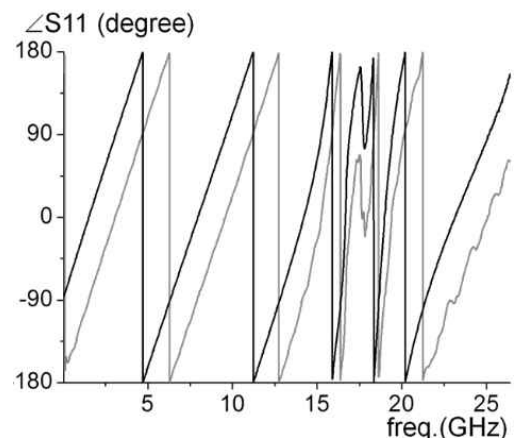
주파수가 올라갈수록 SOS에 의한 측정 결과에는 ripple들의 폭이 증가한다. 이는 한정된 측정 시간의 데이터만으로 주파수 해석을 했기 때문에 생기는 현상으로 마치 하나의 구형파를 씌우는 것과 같게 되고, 이는 주파수 영역에서는 주기적인 ripple을 가지는 sinc 함수 형태로 영향을 주므로 그림 10과 같은 특성을 보인다. 이들은 제한된 시간 영역 해석에 의한 주파수 오차이므로 시간 영역 창을 최적화함으로써 완화될 수 있다.

### 5-3 패치 안테나 해석

시간 영역 측정 기법이 안테나의 반사 계수 측정에도 유효함을 검증하기 위하여 서로 다른 band의



(a) 진폭  
(a) Magnitude



(b) 위상  
(b) Phase

그림 10. 필터의 반사 계수 비교  
Fig. 10. Comparison of filter reflection coefficient.

패치 안테나들을 평가하였으며, 각각의 안테나는 4.4 GHz 와 9.3 GHz에서 일차 공진을 갖는다. 그림 11은 두 안테나의 반사 펄스이며, 이로부터 계산된 각각

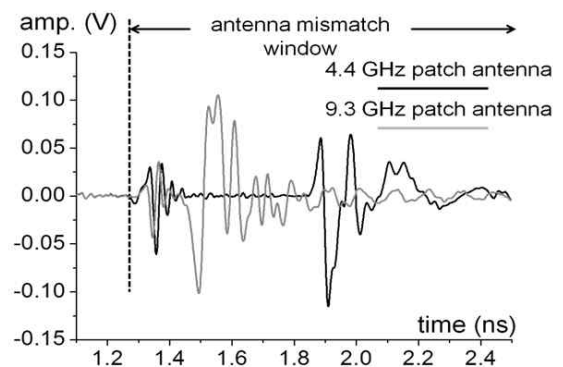
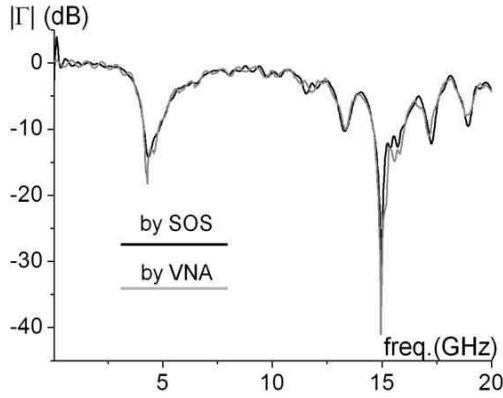
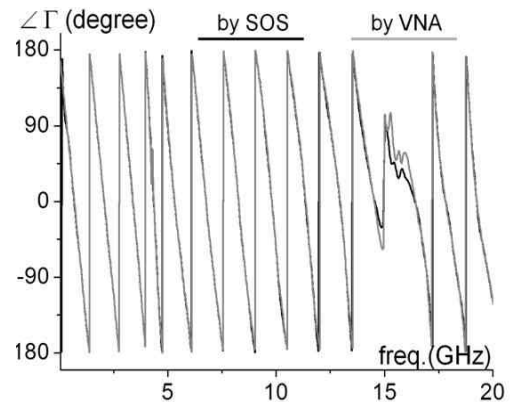


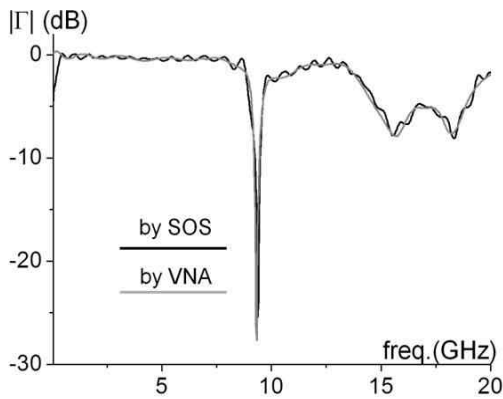
그림 11. 안테나에 의한 시스템의 반사 펄스  
Fig. 11. Reflection pulses due to antennas and system errors.



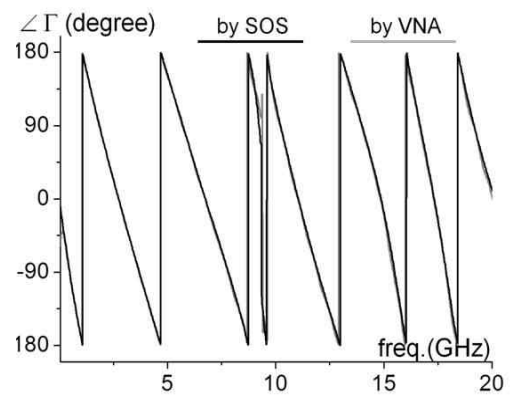
(a) 4.4 GHz 안테나의 진폭  
(a) For 4.4 GHz patch antenna magnitude



(b) 4.4 GHz 안테나의 위상  
(b) For 4.4 GHz patch antenna phase



(c) 9.3 GHz 안테나의 진폭  
(c) For 9.3 GHz patch antenna magnitude



(d) 9.3 GHz 안테나의 위상  
(d) For 9.3 GHz patch antenna phase

그림 12. 안테나들의 반사 계수 비교  
Fig. 12. Comparison of antenna reflection coefficients.

의 반사 계수는 그림 12에서 보인다.

실험에 사용된 결합기의 사양 막인 6 GHz 이하의 저대역에서도, 실험 결과에서 보이듯 300 MHz 정도의 매우 낮은 대역까지 전체적인 패턴이 일치함을 보인다. 이는 calibration에 의해 결합비 편차가 결합기의 통과대역 이하에서도 상당 부분 보정이 되었기 때문이다. 하지만 주파수 변환시 DC에 가까운 성분들은 수치적으로 오류가 발생하게 되므로, 본 실험과 같이 광대역 특성에 중점을 두는 경우는 일반적으로 이 부분을 배제하고 해석한다.

일반적으로 안테나는 이전의 부정합기와 대역 통과기에 비하여 외부 전파환경에 따라 측정 편차가 상대적으로 큰 경향을 보인다. 따라서 외부 영향을 줄이기 위하여 VNA와 SOS를 동일한 실험실 내의 전파 환경에서 안테나를 고정시키고 장비만 바뀌며 측정하였다. 또한, cal kit 값을 실제 알려진 Agi-

lent Technology사의 85052B 모델의 자료를 사용하여 측정 불확도 요인을 개선하였다.

위상 편차는 두 측정 시스템의 기준면 차이에 기인하므로 이를 감안하여 편차를 보정하여 그림 12 (b), (d)에 중첩하여 나타내었다.

이와 같이 3.5 mm 동축 구조의 부정합기, 대역 통과기, 안테나 등의 상용 초고주파 소자에 대한 시간 영역 해석을 통하여, 반사파 측정 결과는 모두 ripple을 제외한다면 전반적인 패턴은 잘 일치함을 확인하였다. Ripple은 주기적으로 나타나기 때문에 smoothing 처리를 통해 간단히 어느 정도 개선할 수 있지만, 이를 최소화하기 위한 최적화된 수치 알고리즘과 개선된 해석 방법은 계속 연구 중이다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 상용의 벡터 회로망 분석기나 초

고속 반사파 측정 모듈 사용하지 않고도 시간 영역에서 초고주파 소자의 반사파를 분석하여 반사 계수를 평가하는 방법을 제시하였다. 광대역 펄스 신호원, 이를 측정할 수 있는 오실로스코프 및 결합기의 간단한 구성으로 쉽게 반사 계수를 측정할 수 있음을 보였다. 결합기에 의한 오차항을 포함한 회로망 모델을 제안하여 실험을 통해 오차항을 효율적으로 유도할 수 있도록 하였다. 이를 적용해 보정한 측정 결과는 상용 벡터 회로망 분석기와 비교적 잘 일치함을 확인하였다.

### 참 고 문 헌

[1] "Time domain analysis using a network analyzer", *Application Note 1287-12*, Agilent Technologies,

2007.

[2] "Applying error correction to network analyzer measurements", *Application Note 1287-3*, Agilent Technologies, 1999.

[3] D. J. Lee, J. Y. Kwon, J. S. Kang, and J. F. Whitaker, "Vector network analysis using a one-path, frequency-multiplied photonic link", *Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 10, no. 4, pp. 282-289, Dec. 2010.

[4] D. J. Lee, J. Y. Kwon, and J. G. Lee, "Spectrotemporal mismatch analysis of a transmission line based on on-wafer optical sampling", *Progress in Electromagnetics Research Letters*, vol. 30, pp. 153-162, Mar. 2012.

### 이 동 준



1995년 2월: 건국대학교 물리학과 (이학사)  
 1996년 2월: 건국대학교 전자공학과 (공학사)  
 1999년 1월: 미국 Polytechnic Univ. 전기전자공학과 (공학석사)  
 2008년 12월: 미국 Univ. of Michigan 전기전자공학과 (공학박사)

1999년 10월~2002년 8월: 삼성전자 무선사업부 선임연구원

2009년 2월~현재: 한국표준과학연구원 전자파센터 선임연구원

2012년 3월~현재: 과학기술연합대학원대학교 측정과학부 겸임부교수

[주 관심분야] 전기광학 기반 안테나 측정, 초고출력 측정용 전기광학 센서 개발, 광기반 벡터회로망분석기 제작, 광기반 초고속 펄스 측정 시스템 개발

### 권 재 용



1995년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)  
 1998년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)  
 2002년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)  
 2002년 2월~2005년 3월: LG전자기술원 소재재료연구소 선임연구원

2005년 4월~현재: 한국표준과학연구원 전자파센터 책임연구원

[주 관심분야] 전자파 측정표준(전자파 전력, EMC 안테나 등)



소 준 호



1988년 2월: 서울시립대학교 전자공학과 (공학사)  
1990년 2월: 서울시립대학교 전자공학과 (공학석사)  
2006년 2월: 서울시립대학교 전자공학과 (공학박사)  
1990년 2월~현재: 국방과학연구소

책임연구원/그룹장  
[주 관심분야] 능동위상 배열안테나 및 전자파 수치해석

강 노 원



1991년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)  
1994년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)  
2004년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)  
1994년 3월~1999년 2월: LG산전

(주) 연구소  
2004년 3월~현재: 한국표준과학연구원 전자파센터 책임연구원/센터장  
[주 관심분야] 전자파 측정 표준(안테나, 전자기장의 세기), 초고주파 측정시스템