

## VNA를 이용한 측정에서의 불확도 평가

문 장 원, \*박 준 영, \*\*박 성 교, \*\*박 종 백

조선대학교 대학원, \*KORA

\*\*조선대학교 전자·정보통신공학부

전화 : 062-230-7063 / 핸드폰 : 019-622-5962

### Uncertainty Estimation of Measurement Using a VNA

Jang Won Moon, \*Jun Young Park, \*\*Sung Kyo Park, \*\*Chong Baek Park

Graduate School Chosun University, \*KORA

\*\*School of EICE Chosun University

E-mail : skcpark@chosun.ac.kr

#### Abstract

In this study, we proposed a specification which is able to estimate the uncertainty more easily and quickly and also able to maintain a confidence level when measuring the magnitude and phase of 1-port and 2-port transmission·reflection coefficient using a VNA and attached coaxial cable probes.

This proposed specification is available when it needs extra special condition of uncertainty estimation and when there is no additional standard equipment like as beadless airline or mismatch standard at the measurement institute. We compared and examined this proposed uncertainty estimation method with recommended EA specification and Agilent specification.

As a result, we think that this proposed specification can be used as a reference for uncertainty estimation and calculation of VNA system, that is, a reference based on the ISO/IEC 17025 requirements.

#### I. 서론

Vector Network Analyzer(VNA)는 RF 및 마이크로 웨이브 측정에 있어 가장 기본이 되는 장비로써, 개발자로 하여금 넓은 주파수 범위에 걸쳐 신속하게 개발 결과를 측정할 수 있도록 도와준다. 측정기 제조업자들은 장비에 대한 신뢰수준을 일정수준으로 유지하기 위해 여러 종류의 불확도(Uncertainty) 요인들을 고려하나 제조업자들에 따라 요인들을 감안하는 정도가 다르므로 불확도는 서로 다르게 나타난다. 이에 불확도를 평가하고 산출하는 방법이 세계적으로 ISO/IEC 17025로 표준화되었지만 많은 측정기 제조업자들이 현재 이를 미처 적용하지 못하고 있는 실정이다[1]. 그리하여 마이크로웨이브용 소자를 개발할 때 생산자 규격으로 산출된 정밀정확도를 적용하면 제품의 정밀정확도 요구수준을 만족하지 못하는 경우가 가끔 발생하

게된다. 이는 온도·습도 변화, 경년 변화, 우연 영향, 케이블의 움직임, 어댑터의 미세 불순물 등 여러 가지 불확도 구성 요인들의 조건을 최악의 경우로 감안하여 제시하고 있기 때문이다. 그러나 케이블을 일정하게 고정시켜 유지하고, 습도와 온도의 변화를 최소화하며 또 어댑터 청소 등 측정의 여러 가지 요구조건을 충족 시키면서 일정한 절차를 준수할 수 있는 조건이 완비된 실험실에서의 측정 불확도는 이들 여러 가지 영향을 사전에 정확하게 평가하여 제거할 수 있으므로 생산자규격보다 상대적으로 정밀·정확한 값을 얻을 수 있다[2,3]. 특히 전자파분야는 현재 국제표준의 적용에 많은 어려움이 따르기 때문에 세계적으로 조속한 시간 내에 이 전자파분야 측정에 적용할 수 있는 적절한 불확도 평가 기준 제시가 필요하다.

이에 본 연구에서는 많은 측정시설에서 각 시설의 측정 특성들을 최대한 감안하여 불확도를 보다 짧은 시간에 정확하게 구할 수 있는 기준을 제시하기 위하여, VNA와 이에 부착된 동축케이블 프로브(Probe)를 이용하여 1 포트 및 2 포트 반사·전송 계수의 크기와 위상을 측정할 때 위의 사항들을 고려한 측정 불확도를 구하여 생산자 규격과 비교·평가하고, 또 그에 따른 일정 신뢰도에 대한 생산자의 요구사항을 고찰하여 ISO/IEC 17025를 기반으로 하는 불확도 평가에 있어 하나의 기준이 될 수 있도록 하는데 그 목적을 두었다.

#### II. 불확도와 소급성

##### 2.1 오차와 불확도

측정에 있어서 불확도란 신뢰도를 나타내는 어떤 정량적인 값을 측정결과와 함께 나타내어야 할 때 그 측정값과 이상적인 참값 사이의 관계를 평가하고 보정하여 그 결과에 대한 판단의 개념으로서 도입한 것이다. 이러한 불확도의 개념은 ISO가 BIPM, IEC 등의 국제기구와 합동으로 1993년 측정 불확도 표현 지침서

를 발행한 것을 기반으로 한다[4]. 다시 말해 불확도란 측정 또는 추정된 량과 이미 알고 있는 어떤 개념이나 표준과의 상관관계를 나타내는 파라미터라 정의할 수 있다. VNA의 측정 오차는 원시 오차와 잔류 오차의 두 형태로 구분할 수 있는데 이때 잔류오차는 자체교정을 한 후에도 남아있는 오차이고 원시 오차는 자체교정하기 전 시스템과 관련된 오차로서 이에겐 계통·우연·드리프트 오차 3가지가 있다. 그러나 오차보정(자체교정)후의 측정오차는 잔류계통·우연·드리프트 오차의 합성된 불확도로 정의된다

(1) 계통 오차

보정할 수 있는 계통 오차는 측정할 수 있는 반복적인 오차로서 측정 셋업시 부정합과 누설, 기준신호와 측정신호경로 사이의 격리도, 그리고 시스템의 주파수 응답에 의해서 발생된다. 그러므로 이러한 계통오차가 어떻게 정밀하게 정의되고 결정되느냐에 따라서 계통 불확도<sup>(4)</sup>를 줄일 수 있으며, 또한 전체불확도를 줄이는 관건이 된다. 대부분의 높은 주파수 측정에 있어서 계통오차는 측정 오차에 있어 가장 중요한 것으로 나타나며 이런 오차들을 특성화하면, 이것들의 영향들은 효과적으로 제거되어 DUT 응답의 보다 정밀정확한 보정값을 얻을 수 있다. 또한 이런 오차로는 지향성, 신호원 정합, 부하 정합, 격리도 그리고 트래킹 등이 있는데 이를 수량화하면 백터 정밀정확도를 향상시킬 수 있다. 그러나 우연오차와 드리프트오차는 정밀하게 수량화 할 수 없기 때문에 측정된 데이터에 누적하여 불확도를 산출하여야 한다.

(2) 우연 오차와 드리프트 오차

우연 오차의 원인은 잡음, 커넥터 반복성, 연결되는 케이블의 안정도들이다. 이러한 것들은 비 반복적인 오차로서 측정과 교정에 있어서 일정하게 영향을 미치지 않기 때문에 정확히 측정하거나 보정할 수 없는 형태이다. 이런 오차들은 VNA에서 전송과 반사측정 모두에 영향을 미친다. 우연 오차들은 주로 잡음과 커넥터 반복성에서 측정 편이로 나타나며, 또한 드리프트 오차는 주파수 변화, 온도 드리프트, 교정하고 측정하는 동안 또 다른 물리적 변화들에 의해 나타난다. 특히 드리프트 오차는 시간의 흐름에 비례하여 영향을 끼친다.

VNA의 측정 결과는 DUT 응답에 모든 오차 항이 더해진 백터 합이다. 그러므로 실제 DUT 응답에 있어서는 측정 결과값은 크기와 위상과 관련하여 의존되는 각 오차에 의해 영향을 받는다.

일반적인 측정에 있어서 잡음에는 낮은 레벨 잡음(noise floor)과 높은 레벨 잡음(trace noise)의 두 가지 형태가 있는데 낮은 레벨 잡음은 IF 대역폭을 변화시키거나, 평균화를 통하여 제거시킬 수 있는 수신기의 광대역 바닥잡음이다. VNA 내부의 LO 신호원의 위상 잡음에 기인한 높은 레벨 잡음 또는 트래킹 잡음은 장비의 고유특성으로서 거의 고정된 것으로 볼 수 있다. 케이블의 경우 일정하게 유지하여 오차를 최소화시킬 수 있으며, 드리프트 오차는 환경 온도의 변화와 장비의 경년 변화에 의해 발생하므로 온도, 습도 등을 일정하게 해주고 측정장비의 특성을 점검(상위표준과 비교하거나, 상위 기관으로부터 교정)함으로써 불확도를

최소화시킨다. 우연 및 드리프트 불확도들은 정밀하게 수량화될 수 없으므로 측정된 데이터에서 누적하여 불확도를 산출하여야한다. 또한 측정 불확도 평가는 계통불확도 보정 후 측정 시스템의 계통에 잔류된 불확도와, 드리프트 불확도 그리고 우연불확도를 포함, 기타 여러 불확도의 조합으로 평가할 수 있다.

2.2 소급성

소급성(Traceability)은 의문시되는 측정 량에 대해 하나 혹은 그 이상의 단계에서 측정장비의 지시 값과 국가표준, 더 나아가 국제표준과 비교하는 절차이며, 측정에 있어서 결과는 상위표준으로부터 교정된 장비를 이용하여 측정하고 또한 불확도처럼 SI 단위에 의해 소급성이 산출될 수 있음을 입증할 수 있어야 한다. 이 때 소급성 입증에 불가능한 경우 ISO/IEC 17025의 관련 요건을 충족할 수 있다면 이해 당사자간에 규정된 표준 기기의 사용여부를 합의하여 측정할 수 있다.

Ⅲ. 오차 모델과 불확도 평가

3.1 1 포트 오차 모델[5,6]

(1) EA모델

S<sub>11</sub>과 S<sub>22</sub>의 측정을 위해서, VNA 오차모델은 다음과 같은 주된 오차 항들을 이용하여 나타낼 수 있다.

$$U_{VRC} = D + T\Gamma + M\Gamma^2 + R_{VRC} \quad (1)$$

여기서

- Γ : 전압 반사 계수 측정치
- D : 유효 지향성 측정치
- T : 트래킹과 비선형성에 대한 전체적인 영향 평가
- M : 유효 측정 포트 정합 측정치
- R<sub>VRC</sub> : 우연 영향

(2) Agilent 모델

측정 디바이스의 반사계수(크기와 위상)의 측정에서, 비록 그 측정이 주의 깊게 행하여 졌다 할지라도, 측정된 데이터는 실제와 다르다. 지향성, 신호원 정합, 반사 신호 경로 주파수 응답(트래킹)은 오차의 주된 원인이다. S<sub>11A</sub>에 대해 전개한 1 포트 오차 모델 수식은 다음과 같다.

$$S_{11A} = S_{11M} - E_{DF} / [E_{SF}(S_{11M} - E_{DF}) + E_{RF}] \quad (2)$$

3.2 2 포트 오차 모델[5,6]

(1) EA모델

a. 반사 U<sub>VRC</sub>

2 포트 디바이스의 Γ=S<sub>11</sub>과 Γ=S<sub>22</sub>의 측정을 위하여, 1 포트 측정 경우와 비슷한 불확도 모델이 사용될 수 있지만, 유효 부하 정합 Γ<sub>L</sub>(다른 측정 포트)과 DUT의 공칭 감쇠량 S<sub>21</sub>을 고려하면 (3)식과 같다.

$$U_{VRC} = D + T\Gamma + M\Gamma^2 + R_{VRC} + S_{21}^2 \Gamma_L \quad (3)$$

b. 전송  $U_{TM}$

$S_{12}$ 와  $S_{21}$  측정의 경우, VNA 오차 모델은 수식 (4)와 같이 단지 주요 오차 항만 사용하여 나타낼 수가 있는데 이 때 값들은 dB 형태의 대수값으로 가정한다.

$$U_{TM} = L + M_{TM} + I + R_{dB} \quad (4)$$

여기서

- L : 선형성으로부터의 시스템 편차 측정치
- $M_{TM}$  : 부정합에 의한 오차 항 계산치
- I : cross-talk 측정치 (dA)
- $R_{dB}$  : 모든 우연 영향

(2) Agilent 모델

2 포트 디바이스의 전송계수(크기와 위상) 측정을 위한 오차 모델은 비슷한 방법으로 산출할 수 있다. 오차의 잠재적인 원인에는 주파수 응답(트래킹), 신호원 정합, 부하 정합, 그리고 격리 등이 있는데, 이런 오차들은 전 2 포트 오차 모델을 사용함으로써 효과적으로 제거될 수 있다. 식 (5)~(8)은 2 포트 디바이스의 네 가지 모든 S-파라미터에 대한 전 2 포트 오차 모델 수식을 나타낸다. 이러한 포괄적인 모델을 위한 수식은 모든 순방향 및 역방향 오차 항과 측정된 값을 사용하므로 어떤 한 개의 파라미터에 대한 전 오차 정정을 행하기 위해서는 필히 S-파라미터 네 가지 모두가 측정되어야 한다.

$$S_{11} = \frac{[1 - \frac{S_{21} - E_{21}}{E_{21}}] [1 + \frac{S_{12} - E_{12}}{E_{12}}] - [\frac{S_{11} - E_{11}}{E_{11}} - \frac{S_{22} - E_{22}}{E_{22}}] E_{12}}{[1 + \frac{S_{11} - E_{11}}{E_{11}}] E_{12} + [\frac{S_{21} - E_{21}}{E_{21}} - \frac{S_{12} - E_{12}}{E_{12}}] E_{11}} \quad (5)$$

$$S_{21} = \frac{[1 + \frac{S_{11} - E_{11}}{E_{11}}] (E_{12} - E_{11}) - \frac{S_{11} - E_{11}}{E_{11}} E_{12}}{[1 + \frac{S_{11} - E_{11}}{E_{11}}] E_{12} + [\frac{S_{21} - E_{21}}{E_{21}} - \frac{S_{12} - E_{12}}{E_{12}}] E_{11}} \quad (6)$$

$$S_{12} = \frac{[1 + \frac{S_{22} - E_{22}}{E_{22}}] (E_{12} - E_{11}) - \frac{S_{22} - E_{22}}{E_{22}} E_{12}}{[1 + \frac{S_{22} - E_{22}}{E_{22}}] E_{12} + [\frac{S_{21} - E_{21}}{E_{21}} - \frac{S_{12} - E_{12}}{E_{12}}] E_{11}} \quad (7)$$

$$S_{22} = \frac{[\frac{S_{21} - E_{21}}{E_{21}}] [1 + \frac{S_{12} - E_{12}}{E_{12}}] - [\frac{S_{11} - E_{11}}{E_{11}} - \frac{S_{22} - E_{22}}{E_{22}}] E_{12}}{[1 + \frac{S_{22} - E_{22}}{E_{22}}] E_{12} + [\frac{S_{21} - E_{21}}{E_{21}} - \frac{S_{12} - E_{12}}{E_{12}}] E_{11}} \quad (8)$$

3.3 불확도 평가

(1) 불확도 평가의 원리

VNA가 정확하게 자체 교정되어지고 이상적인 무손실 전송선로가 자체 교정시 사용되어진 포트 사이에 삽입되어진다면, VNA는 위상 천이를 제외하고는 자체 교정하는 동안 입력된 S-파라미터와 똑같은 값을 측정해야 한다. 자체교정이 완벽하지 않으면 잔류 오차 항이 존재하는데 이것들은 측정 포트에 위치한 잔류 백터와 위상이 천이 된 교정장치의 현재 특성간의 위상 변화 때문에 나타난다.

(2) 불확도의 계산

불확도의 영향은 포함인자 k=2에 근거하는 확장불확도를 공급하기 위하여 ISO/IEC 17025 요건에 의거 합성되어야 하는 데 다음의 몇 가지 점들을 고려해야 한다.

- 비록 대부분의 영향들이 상관관계가 없는 것으로 고려되어지더라도 VNA 교정과정에서의 공동 요인 때문에, 유효지향성과 유효신호원(테스트 포트)정합은 어느 정도 상관관계가 있을 가능성이 있다. 그러나 이런 상관계수 평가에 관한 어떤 기준들을 찾는 것이 불가능하여 신뢰할 만한 정보가 없는 경우 상관계수를 +1로 가정하는 것이 권고된다. 이것은 지향성, 신호원(테스트 포트)정합에 대한 불확도 영향들이 일반적인 방식 즉 RSS방식으로 다른 영향들과 합성되기 전에 함께 더해져야 한다고 하는 것을 의미한다.
- 지향성이나 신호원(테스트 포트)정합과 같은 두 백터의 상대적인 위상에 따르는 영향들은 U-형의 확률 분포를 갖는데, 이 영향에 대한 표준불확도는 한계 값을  $\sqrt{2}$ 로 나누어 얻는다. 그러나 전송 측정시 계통불확도 수식을 이용하여 계산된 불확도는 다른 U-형의 영향에 변화를 주게된다. 그리고 이 영향은 직사각형 확률분포를 갖는다고 할 수 있다. 측정 데이터(A형 평가)로부터 유도된 불확도는 정규분포라고 가정되어질 수 있다. 그러나 정규분포라는 증거가 없으면 환경상태와 제작자의 데이터의 영향은 직사각형 분포를 갖는다고 가정되는 것이 권고된다. 오차 항 각각의 정밀한 효과는 실제 측정장비용담에 대한 그것의 크기와 위상관계에 달려있는데 오차 응답의 위상이 알려져 있지 않을 때의 위상은 최악의 조건(  $-180^\circ \sim +180^\circ$  )으로 가정된다.

IV. 측정 및 고찰

본 연구에서는 VNA를 이용한 측정 시 불확도를 평가하기 위해서 다음과 같이 6종류의 경우를 각 경우마다 EA 권고 규격, Agilent 규격, 제안 규격 3가지로 분류하여 측정하고 고찰하였다.

- 1 포트 측정시의 불확도
  1. 낮은 주파수에서의 반사계수 측정
  2. 높은 주파수에서의 반사계수 측정
- 2 포트 측정시의 불확도
  1. 낮은 주파수에서의 반사계수 측정
  2. 높은 주파수에서의 반사계수 측정
  3. 낮은 주파수에서의 전송계수 측정
  4. 높은 주파수에서의 전송계수 측정

- 측정에 사용된 VNA 및 여러 표준장비들은 다음과 같다.
- 교정 키트 : HP 85054B (개방, 단락, 부하, 슬라이딩 부하, APC7 to N 어댑터)
  - 베리피케이션 키트 : HP 85055A (20 dB · 50 dB 감쇠기, 50 Ω 에어라인, 20 Ω 부정합 에어라인)
  - 비드리스 에어라인 : Maury 2553T30
  - 50 Ω 기준 종단 : HP 909F
  - 부정합 종단 : Maury 2562L (VSWR : 1.05, 1.2, 1.5, 2.0)
  - 감쇠기 및 스텝 감쇠기 : HP 11582A (3 · 6 · 10 · 20 dB), HP 8494B (0 ~ 11 dB, 1 dB 단계), HP 8496B (0 ~ 110 dB, 10 dB 단계)
  - VNA : HP 8722ES (50 Mhz ~ 40 GHz)

- 기타 부대품 : 테스트 포트 어댑터 (2.4 mm to APC7) 등

V. 결론

위와 같은 장비들을 이용하여 측정할 때 VNA와 부대품 등의 조작은 항상 일정한 절차를 따라야 한다. 특히 반복측정 할 때마다 편차가 많이 발생하면 신뢰할 만한 데이터 수집이 불가능하므로 다음과 같은 측정 절차를 준수하여 신뢰도를 증가시킨다.

- 측정실의 온도와 습도가 원하는 범위(23±2 °C, 55 % R.H. 이하)안에 유지되도록 확인, 기록한다.
- 측정을 시작하기 전에 계기와 모든 커넥터 및 어댑터들에 불순물이 있는가 등을 조사하고 필요한 경우 청소하거나 교체한다.
- 사용되는 모든 커넥터는 항상 일정한 표준 검사를 하여야한다.
- 커넥터의 반복성 개선과 성능을 유지하기 위하여 토크 렌치를 사용하여 항상 일정한 결합세기를 유지하도록 한다.
- 일정 측정 규격에 요구되는 케이블과 측정 단자 어댑터 등을 결합할 때 측정면이 회전되어 측정면에 굽힘이 발생하면 어댑터 자체가 가지고 있는 불확도 요인이 증가하므로 주의하여 결합한다.
- VNA를 사용하기 전에 예열(30분 이상)이 충분히 되었는지 확인한다.
- 상위기관에서 교정된 표준기로 측정하여 측정결과를 반복 확인한다.
- VNA를 이용한 측정은 1 포트나 전 2 포트 자체 교정을 수행한다. 단 여기서 감쇠량을 갖는 전송계수의 선형성 측정 시에는 필히 전 2 포트 자체 교정을 한다.

본 연구에서는 VNA와 부착된 동축케이블 프로브를 이용하여 1 포트 및 2 포트 전송·반사 계수의 크기와 위상을 측정할 때 보다 더 빠르고 쉽게 불확도를 평가할 수 있으면서도 신뢰수준을 유지할 수 있는 규격을 제안하였다. 이 규격은 측정기관에서 특별한 불확도 평가조건 이외의 경우와 비드리스 에어라인이나 부정합 표준과 같은 추가표준 장치가 없는 경우에도 사용할 수 있다.

일반적으로 생산자가 제시한 계통불확도 규격은 거의 모든 발생 가능한 불확도를 감안하여 최악의 경우로 제시되어 있기 때문에 직사각형분포, 신뢰수준 99.7 %, 포함인자 3이 적용되어진다. 반면에 본 연구에서 제안한 규격은 생산자 규격의 요소 중 고려치 않았던 영향들을 반복측정(A-형)에 의한 불확도로 평가하여 이러한 영향들이 측정 시 실제 측정 할 때와 같이 감안되게 하였다. 또한 제안한 불확도 규격에 여유를 주기 위해 생산자의 계통불확도 규격을 안정도 및 잡음의 영향들이 충분히 무시 될 수 있는 신뢰수준 95 %, 포함인자  $\sqrt{3}$ 으로 낮추어 평가하여 신뢰도를 더욱 높였다.

본 연구에서 제안한 불확도 평가방법을 생산자 규격 및 EA 권고 규격과 비교·검토한 결과, VNA시스템과 교정 키트 등이 상위기관에 의해 교정되어져 최소한의 소급성이 확립된다면, 제안 규격을 이용하여 VNA시스템의 불확도를 평가하여 불확도 평가와 산출의 표준 규격 즉, ISO/IEC 17025에서의 요구사항을 기반으로 하는 기준으로 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

표 1에 6가지 경우의 불확도 측정결과를 나타냈다.

표 1. 6가지 경우와 3 종류의 사양

Model	Free (dB)	Uncertainty			VRC and Attenuator	Note	
		kinds	spec of EA	spec of Agilent			proposed spec
1 Port	Refl Low	1	Mag 0.003408	0.004561	0.005454	0.0909	
		Phase		0.531588	0.522495		
	Refl High	18	Mag 0.033904	0.010600	0.015779	0.3333	
		Phase		0.503459	0.530696		
2 Port	Refl Low	1	Mag 0.003359	0.010310	0.012766	0.0069	
		Phase		0.581842	4.892		
	Refl High	18	Mag 0.031388	0.016881	0.024875	0.0706	
		Phase		0.611079	1.338132		
	Trans Low	1	+Mag 0.024321	0.055503	0.057730	20 dB (Att)	S21A
		-Mag		-0.053859	-0.058116		S21A
	Trans High	18	+Mag 1.003573	1.105928	1.246635	70 dB (Att)	S21A
		-Mag		-1.267571	-1.456030		S21A
		Phase		0.715090	3.666383		

\* Refl : reflection Trans : transmission  
 Low : low frequency High : high frequency  
 VRC : voltage reflection coefficient

- [1] ISO ISO/IEC 17025, "General requirements of the competence of testing and calibration laboratories," 1999.
- [2] 한국표준과학 연구원, "국가측정표준의 국제 보증 사업-숙련도시험-전자파분야 (KRIS/IR-2000-020)," 2000.
- [3] C. F. Mathee, "The determination of the uncertainty associated with measurements performed using a vector network analyzer," Proceedings of 5th Africon Conference, IEEE Africon, pp.1117-1120, 1999.
- [4] ISO Technical Advisory Group 4(TAG4), "Guide to the expression of uncertainty in measurement," 1993.
- [5] EA EA-4/02, "Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration," 1999.
- [6] Agilent Technologies Agilent PN 8510-5A, "Specifying Calibration Standards for the Agilent 8510 Network Analyzer".