

에어라인 임피던스 표준을 이용한 복소반사계수의 보정

정희원 신진국*, 김정환*, 최익권**

Correction of the Complex Reflection Coefficient Using Air Line Impedance Standards

Jin Koog Shin*, Jeong Hwan Kim*, Ik Guen Choi** *Regular Members*

요약

300 MHz~8 GHz의 주파수 범위에서 개선된 반사계수 측정시스템이 기술된다. 에어라인 임피던스표준을 이용하여 복소반사계수가 보정된다. 표준 부정합이 임피던스의 전달표준으로 이용되었다. 슬롯트드라이를 이용하여 얻어진 표준부정합의 반사계수를 비교하기 위하여 벡터 회로망분석기가 이용되었다.

ABSTRACT

An enhanced measurement system of reflection coefficients in the frequency range of 300 MHz~8 GHz is described. Complex reflection coefficients are corrected by using air line impedance standards. A standard mismatch was used as the transfer standard of the impedance. An automatic network analyzer was used for the comparison of the reflection coefficients of standard mismatch obtained by using the slotted line.

I. 서론

초고주파나 마이크로파 대역에서 임피던스의 일차 표준으로 사용되는 것은 동축형의 경우에는 정밀 에어라인(air line : AL)이고, 도파관의 경우에는 도파관 선로이다. 도파관의 경우에는 정밀 가공된 $\lambda/4$ 천이 단락회로가 일차 표준으로 사용되기도 한다. 정밀 에어라인은 균일한 동축선로로서 내부에 공기의 유전체를 가지며, 양쪽 끝단은 정밀 동축형 연결기를 가지고

있다. 이 경우 에어라인의 중심도체의 외경과 외부도체의 내경에 의해 결정되는 선로의 특성 임피던스가 임피던스의 기준으로 사용된다. 도파관의 경우에는 균일한 도파관 선로의 단면의 기하학적 구조로부터 결정되는 특성 임피던스를 임피던스의 표준으로 삼을 수도 있고 단락회로 또는 개방회로를 표준으로 삼을 수도 있다. 그런데 도파관의 경우에는 물리적으로 개방된 도파관은 개방회로가 되지 못하며 $\lambda/4$ 천이 단락회로가 개방회로의 역할을 한다. 또한 단락회로의 경우에는 플랜지에서의 큰 전류손실로 인해 단락회로의 반사계수가 정확한 $1 \angle 180^\circ$ 가 되기 어렵기 때문에 보다 정확한 표준으로는 개방회로 즉 $\lambda/4$ 천이 단락회로를 임피던스의 표준으로 많이 사용한다. 그리고 임

* 한국표준과학연구원

** 충북대학교 전기전자공학부

論文番號 : 98227-0519

接受日字 : 1998年 5月 19日

피더스의 전달표준으로 사용되는 것에는 동축형 또는 도파관형의 표준 부정합들이 있다. 동축형 표준 부정합은 50 Ω의 특성 임피던스를 갖는 선로의 끝단에 특정한 저항으로 단말시키고 입력측에는 동축형 연결기 단 구조를 갖고 있다. 도파관형 부정합은 도파관 단면이 일반적으로 사용되는 규격의 도파관 단면에 대해 특정한 불연속을 갖는 도파관 선로의 끝단에 무반사 단말을 붙여서, 도파관 단면의 불연속 정도에 따라서 여러가지 크기의 정재파비를 갖도록 설계된 것이다.

전자파 임피던스는 정밀 슬롯티드 라인, reflectometer system, six-port analyzer system, 벡터 임피던스 분석기 및 회로망 분석기 등을 이용하여 동축형의 경우는 10 MHz~50 GHz의 주파수 범위에서 그리고 도파관의 경우는 8.2~40 GHz의 주파수 범위를 4개 대역(X, Ku, K, Ka)으로 나누어 각 대역에서 측정된다.

본 논문에서는 300 MHz~8 GHz 대역의 전자파 임피던스를 정확하게 측정하기 위하여 전달표준인 표준 부정합의 반사계수를 GR 900 연결기를 가진 슬롯티드 라인을 이용하여 측정하였으며, 일반적으로 슬롯티드 라인을 이용한 측정에서 SWR meter의 눈금을 읽을때 생기는 오차를 줄이기 위해 프로브를 이동시키는 것과 프로브를 통해 출력되는 데이터를 수집하고 계산하는 과정을 컴퓨터를 이용하여 자동화하였다. 그리고, 에어라인을 이용한 슬롯티드 라인의 오차 감소법을 개발함으로써 고주파전압의 정확한 측정을 할 수 있게 되었다.

II. 측정시스템

슬롯티드 라인을 이용한 임피던스 측정시스템의 구성도를 Fig. 1에 나타내었다. 여기서 DUT (device under test)로는 전달표준인 GR 900-WR110(S/N 685) 표준 부정합을 이용하였다. 신호를 감지하기 위한 감지기로서는 crystal detector를 사용하였고 감지기 출력의 감도를 양호하게 하기 위하여 신호발생기의 신호를 가청주파수(1 kHz)로 변조시키고 감지기 출력은 가청주파수 증폭기로 증폭시키게 된다. 프로브가 이동한 거리를 정확하게 측정하기 위하여 디지털 선형자와 결합되도록 어댑터를 제작하여 부착하였다. 슬롯티드 라인의 프로브와 디지털 선형자가 함께 이동하기 때문에 수평과 평행을 유지하기 위하여 알루미늄 판 위에 고정시키고 프로브의 축에 연결장치를 제

작하여 스텝모터와 결합시켜 측정주파수에 따라 자동으로 이동하게 하였다. 프로브와 결합된 디지털 선형자가 이동한 거리는 0.1 mm의 분해능을 가진 카운터에 표시되고 이것은 RS-232C를 통해 컴퓨터를 이용하여 메모리에 저장된다. Crystal detector에 의해 감지된 신호는 SWR meter를 통해 디지털전압계에 표시되고 IEEE-488 bus를 경유하여 컴퓨터에 의해 수집된다. 하드웨어의 구동과 계측, 그리고 계산을 위해 C언어에 기초하여 개발된 Labwindows를 이용하였다.

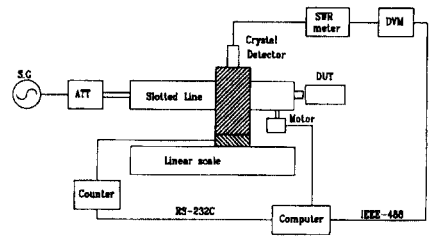


Fig. 1 Block diagram of the reflection coefficient measurement system.

III. 실험

3.1 Residual VSWR

슬롯티드 라인을 이용한 초정밀 측정에 있어서, 사용자가 결정해야할 한가지 전기적인 성능특성은 residual VSWR이다. 슬롯티드 라인이 손상을 입지않고 재조립을 하지 않았더라도 슬롯티드 라인의 구조적인 문제로 인해 1%의 수십분의 1에 해당하는 residual VSWR을 가지며 이것은 VSWR 측정에 있어서 보정을 해 주어야 한다. Residual VSWR에 대한 원인을 살펴보면 아래와 같다.

1) 슬롯의 특성임피던스

외부도체에 있는 슬롯은 라인의 단위길이당 capacitance를 감소시키고 슬롯이 있는 영역에서 특성 임피던스를 조금 증가시킨다. 약간의 임피던스 변화는 동축선로의 치수로부터 계산될 수 있다[1].

$$\Delta Z_0 = \frac{Z_0 W^2}{4\pi^2(X^2 - Y^2)} \quad (1)$$

여기서, X = 내부도체의 반경, Y = 외부도체의 반경, W = 슬롯의 폭.

임피던스가 조금 변화하면 슬롯영역에 있는 내부도체의 직경을 증가시킴으로써 보상되어야 하는 불연속을 나타낸다. 슬롯은 정확하게 중심을 잡아야 하고 거칠게 판 자국이나 결함이 없어야 한다.

2) Step discontinuities

동축형에서 slab-type 단면으로 바뀌는 것처럼, 직경에서의 변화는 완전히 보상될 수 없는 심각한 반사를 일으킨다. Type 900-LB 슬롯티드 라인은 라인의 슬롯부분과 슬롯이 있지 않은 부분이 모두 동축형 단면을 유지함으로써 이러한 문제를 피할 수 있다[2].

3) 연결기의 반사

3.2 Residual VSWR의 측정방법(3).

1) 튜너-단말 결합과 에어라인을 이용한 방법

먼저, 측정하고자 하는 주파수 대역의 튜너를 50 Ω 단말에 연결하여 슬롯티드 라인의 type 900-BT 연결기에 부착하고, 슬롯티드 라인의 모든 정재파를 제거하기 위하여 튜너의 조정손잡이를 적절히 조정한다. 이때 프로브 출력에 연결된 정재파측정기의 눈금이 움직이지 않아야 한다. 다음에 튜너-단말 결합과 슬롯티드 라인 사이에 적당한 에어라인을 설치하고, 슬롯티드 라인의 프로브를 1 파장 이동시켜 감지기를 통해 출력된 전압으로 정재파비(S)를 계산하고 이 값을 아래의 식을 이용하여 슬롯티드 라인의 정재파비(S_m)를 구한다.

$$S_m = \frac{S+1}{2}, \quad \rho = \frac{S_m-1}{S_m+1} \quad (2)$$

식 (2)를 이용하여 residual 반사계수의 크기(ρ)가 구해지고, 감지기를 통해 출력된 전압 파형의 첫번째 최소위치(x)와 type 900-WN을 부착하고 측정 한 파형이 x와 가장 가까운 최소위치 사이의 거리를 이용하여 residual 반사계수의 위상(θ)을 구한다.

2) DUT와 에어라인을 이용하는 방법

슬롯티드 라인이 Γ_m 의 반사계수 값을 가지고 DUT가 Γ_l 의 반사계수 값을 가진다고 가정하고 DUT를

슬롯티드 라인에 부착하여 측정하면 두 벡터의 합과 같은 반사계수 Γ' 을 얻는다.

$$\Gamma' = \Gamma_m + \Gamma_l \quad (3)$$

슬롯티드 라인과 DUT 사이에 $\lambda/4$ 파장의 홀수배에 해당하는 에어라인을 연결하면 DUT의 반사계수는 에어라인에 의하여 스미스 도표 상에서 역으로 된다. 이것은 Γ_l 의 부호를 +에서 -로 바꾸는 것과 같다.

$$\Gamma'' = \Gamma_m - \Gamma_l \quad (4)$$

식 (3)과 (4)를 이용하면 Γ_m 과 Γ_l 을 구할 수 있다.

$$\Gamma_m = \frac{\Gamma' + \Gamma''}{2} \quad (5)$$

$$\Gamma_l = \frac{\Gamma' - \Gamma''}{2} \quad (6)$$

3.3 DUT의 반사계수 측정

DUT의 반사계수 측정에 대한 흐름도를 Fig. 2에 나타내었다.

먼저, 신호발생기에 측정할 주파수를 입력하고 DUT를 연결한다. 측정주파수에 따라 프로브가 이동할 거리가 정해지고 스텝모터의 구동을 위한 펄스수를 계산한다. 스텝모터의 채널과 속도를 설정하고 카운터와 디지털전압계를 초기화한다. 스텝모터의 구동과 데이터수집을 시작하고 프로브가 이동거리에 도달하면 원점으로 이동시키고, 저장할 디렉토리와 파일명을 지정하여 저장한다. 그 다음에 측정한 데이터 화일을 화면에 그려서 최대전압과 최소전압을 찾아 반사계수의 크기를 계산하고 최소전압이 나타나는 지점의 거리(x1)를 읽는다.

$$S = \frac{E_{\max}}{E_{\min}}, \quad \sigma = \frac{S-1}{S+1} \quad (7)$$

DUT를 제거한 후 type 900-WN을 연결하여 출력전압을 측정 한 후 최소전압을 나타내는 위치(x2)를 읽어서 DUT의 반사계수에 대한 위상을 계산한다.

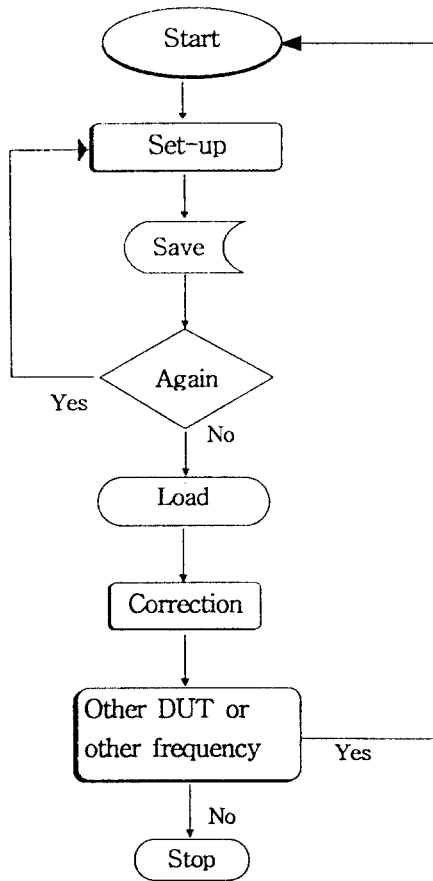


Fig. 2 Flowchart of the DUT measurement.

$$\varphi = 180(1 - \frac{4d}{\lambda}) \quad (8)$$

여기서, $d = |x1 - x2|$, $\lambda =$ wavelength.

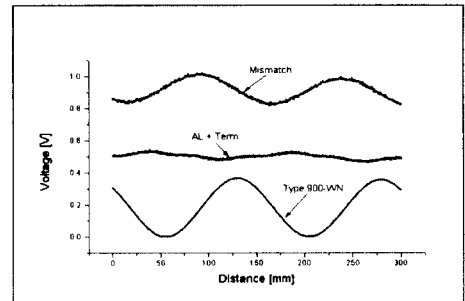
반사계수 $\Gamma = \sigma e^{j\varphi}$ 는 residual 반사계수를 보정하여 주어야 하며, 보정된 반사계수 Γ_x 는 아래와 같다.

$$\Gamma_x = \frac{\sigma \cos \varphi - \rho \cos \theta + j[\sigma \sin \varphi - \rho \sin \theta]}{1 - \sigma \rho \cos(\varphi - \theta) + j[2 \rho \sin \theta - \sigma \rho \sin(\varphi - \theta)]} \quad (9)$$

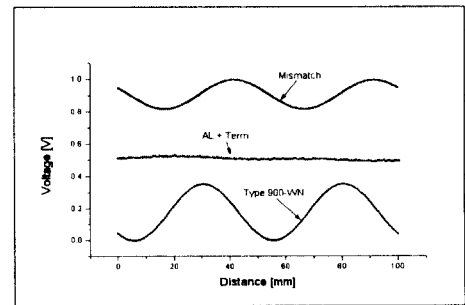
여기서, $\sigma = \Gamma$ 의 크기, $\varphi = \Gamma$ 의 위상, $\rho =$ residual 반사계수의 크기, $\theta =$ residual 반사계수의 위상이다.

Fig. 3은 에어라인과 50 Ω 단말 사이에 튜너를 연결한 후, 이것을 슬롯트드라이브의 type 900-BT 연결기

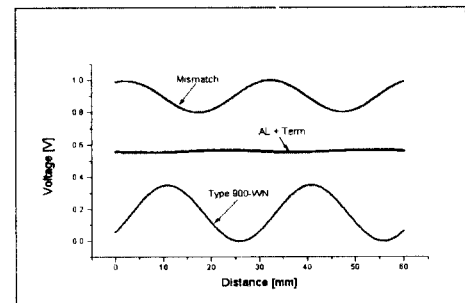
에 부착하고 정재파비 측정기의 출력을 디지털 전압계를 이용하여 읽은 전압 파형이다. 여기서, 거리는 슬롯트드라이브에 연결된 스텝모터의 펄스 수를 읽어서 거리로 환산한 값이다. Fig. 4는 에어라인에 표준 부정합을 연결하여 측정한 데이터이다.



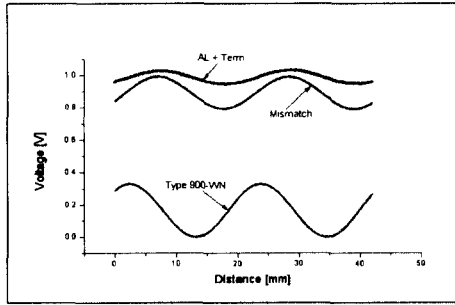
(a)



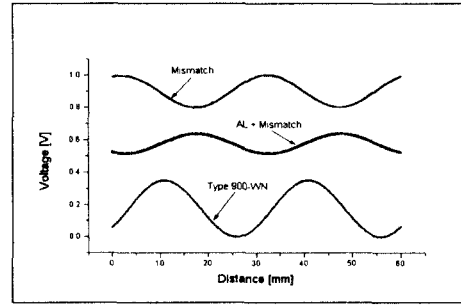
(b)



(c)

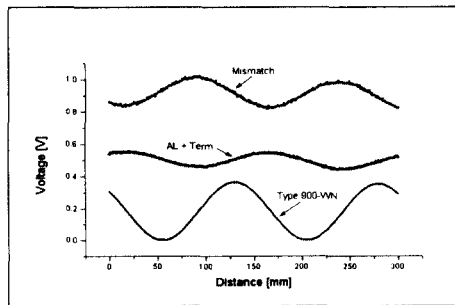


(d)

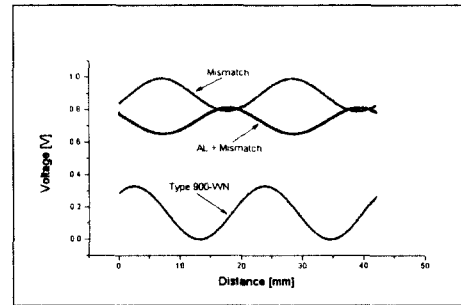


(c)

Fig. 3 Waveform measured by using air line + tuner + 50Ω termination at (a) 1 GHz (b) 3 GHz (c) 5 GHz (d) 7 GHz.

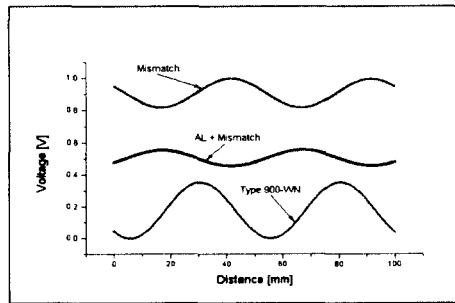


(a)



(d)

Fig. 4 Waveform measured by using air line + mismatch at (a) 1 GHz (b) 3 GHz (c) 5 GHz (d) 7 GHz.



(b)

IV. 실험결과

슬롯티드 라인을 이용하여 전달표준인 표준부정합의 반사계수를 측정된 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 이 측정결과와 비교하기 위하여 회로망 분석기(N.A. : network analyzer)를 이용하여 같은 전달표준의 반사계수를 측정하였다. Fig. 5에 보인 것처럼 튜너와 단말을 이용하여 측정된 반사계수의 크기는 튜너를 조정할때 정재파를 완전히 제거하기가 어렵기 때문에 에어라인과 DUT를 이용한 반사계수의 크기와 차이가 나는 것을 알 수 있다. Residual 반사계수를 구할 경우 튜너의 조정시간이 상당히 오래 걸리고, 조정하는데 어려움이 많기 때문에 에어라인과 DUT를 이용하는 것이 측정시간을 줄이고 측정정확도를 향상시킬 수 있다.

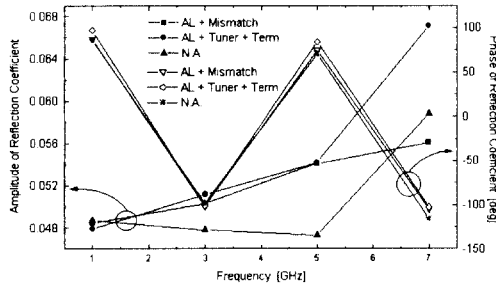


Fig. 5 Complex reflection coefficients of mismatch.

V. 결론

슬롯티드 라인을 이용하여 전자파 임피던스를 자동으로 측정하기 위하여 정밀선형자와 계수기, 프로브를 구동하기 위한 스텝모타와 드라이버, 그리고 컴퓨터에 내장할 수 있는 펄스 발생기, 데이터를 수집하기 위한 IEEE-488 bus와 RS-232C를 설치 하였고, 하드웨어의 구동과 수집된 데이터의 계산을 위하여 Lab-windows를 이용하였다. 이러한 모든 절차가 하나의 윈도우에서 이루어 질 수 있도록 프로그램을 작성함으로써 측정시간을 상당히 줄일 수 있었다. 그리고 에어라인을 이용한 오차감소법을 개발함으로써 RF대역의 정밀정확한 임피던스 측정능력을 향상시킬 수 있게 되었다.

참고 문헌

1. P. P. Delogne and A. A. Laloux, "Theory of the slotted coaxial cable," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques* No.10, oct. (1980).
2. E. E. Hassan, "Field solution and propagation characteristics of monofilar-bifilar modes of axially slotted coaxial cable," *IEEE Trans. on Microwave Theory and techniques*, vol. 3, March(1989).
3. *Type 900-LB Precision Slotted Line*, Instruction Manual, General Radio.



신진국(Jin Koog Shin) 정회원
1960년 5월 3일생
1983년 2월:인하대학교 전자공학과 졸업
1995년 2월:충북대학교 대학원 전기공학과(공학석사)
1995년~현재:충북대학교 대학원 전기공학과 박사과정

1987년~현재: 한국표준과학연구원
※주관심분야: 어레이 안테나, EMI/EMC



최익권(Ik Guen Choi) 정회원
1950년 12월 26일생
1974년 2월:서울대학교 공과대학 자원공학과 (공학석사)
1976년 3월~1979년 6월:육군 제3사관학교 교수부 물리학 전임강사

1981년 10월~1986년 9월:미국 오하이오 주립대학 부설 ESL(Electro Science Laboratory) 연구원

1986년 10월~1987년 9월:미국 메사추세츠 주립대학교 Antenna Laboratory 연구원

1987년 10월~1993년 8월:한국전자통신연구소 이동통신기술연구단

1993년 9월~1994년 3월:전북대학교 정보통신공학과 조교수

1994년 3월~현재:충북대학교 전기전자공학부(전과공학전공) 조교수

※주관심분야: 어레이 안테나, EMI/EMC, RF/MW 통신소자

김정환(Jeong Hwan Kim) 정회원
현재: 한국표준과학연구원 전자파그룹 책임연구원