

## TRL 오차 수정 방법을 개선한 특성 임피던스 추출

김 유신 ,이 창석

국립한밭대학교 정보통신컴퓨터공학부

## Characteristic Impedance Extraction Using TRL Calibration and a Additional Standard

You-Shin Kim ,Chang-Seok Lee

Dept. of Information Communication and Computer Engineering

Hanbat National University

## ABSTRACT

TRL 오차 수정방법은 기판 위에 제작된 고주파 소자를 측정할 때 많이 사용되지만 오차 수정을 위해 제작된 표준 전송선 패턴의 특성 임피던스를 알아야만 보다 정확하게 측정 오차를 수정할 수 있다. 기존의 방법에서는 저항을 중단 처리한 표준 패턴을 추가로 이용하여 전송선의 단위 길이 당 커패시턴스를 계산하고 주파수에 대해 fitting하는 방법으로 표준 전송선의 특성 임피던스를 계산하고 있으나 제작상의 부정확성에 의해 추출된 특성임피던스가 영향을 받고 있음을 확인하였다. 본 연구에서 제안하는 새로운 방법을 이용하면 fitting하는 과정 없이 각각의 측정주파수에서 직접 특성 임피던스 추출이 가능할 뿐 아니라 제작상의 부정확성을 측정결과로부터 처리할 수 있으며 검증 결과 기존 방법 보다 정확한 특성 임피던스를 추출할 수 있었다.

## I. 서론

PCB 또는 반도체 기판 위에 구현된 고주파 회로의 특성을 측정하기 위하여 사용되는 측정오차 수정방법으로 TRL방법[1]이 일반적으로 사용되고 있다. TRL 방법은 회로가 구현된 기판과 동일한 기판에 3 개의 표준 전송선 패턴(T: Thru, R: Reflection, L: Line)을 제작하여 측정함으로써 커넥터 및 기판내의 전송선에 의한 측정 오차를 수정할 수 있어 편리하게 사용할 수 있으나 표준 패턴의 특성 임피던스가 측정 임피던스와 다를 경우 정확한 오차 수정이 되지않는 단점이 있다. 기판 위에 제작된 전송선 패턴의 특성 임피던스는 기판의 두께와 유전율 그리고 패턴의 선포에 따라 달라지며 측정의 정확도에 영향을 미치기 때문에 회로제작에 사용되는 전송선의 특성을 정확히 알 필요가 있다.

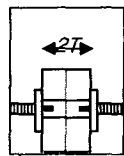
제작된 전송선의 특성 임피던스를 정확히 측정하기 위하여 기존의 TRL 오차 수정 방법에 또 하나의 표준 전송선 패턴을 추가하여 제작된 전송선의 특성 임피던스를 측정하는 방법에 대한 연구가 있었다[2,3]. 이 방법들은 전송선의 등가회로를 구성하는 4 개의 파라미터 즉, 전송선의 단위 길이 당 직렬저항 R, 직렬 인덕턴스 L, 병렬 컨덕턴스 G와 커패시턴스 C를 찾아내어 제작된 전송선의 특성 임피던스를 계산하는 방법이며 병렬 C를 기준으로 계산하는 방법이 비교적 정확한 것으로 알려져 있다[3]. 이 방법은 전송선 끝에 저항을 연결하여 반사계수를 측정한 다음 미리 측정하여 알고있는 저항 값을 이용하여 예상되는 반사계수와 측정된 반사계수의 차이로부터 전송선의 단위길이

이 당 C를 구하는 것이다. 기존의 연구에서는 반도체 기판 위에 제작된 전송선의 특성 임피던스를 계산하고, 전자파 해석 결과를 비교함으로써 이 방법의 타당성을 보여주었다. 이 방법은 표준 패턴의 정확한 길이를 알고 있을 때 가능하며 저항이 연결된 전송선의 끝에 기생 커패시터 성분이 상대적으로 작을 때 사용이 가능하므로 MMIC와 같이 그 길이가 정확히 제어되는 경우 연결하는 저항값을 작게 사용하여 측정이 가능하다. 일반적으로 PCB 기판에서 이와 같은 표준 패턴을 제작하면 저항을 연결하는 위치를 정확히 제어하기 힘들며 기생성분 역시 저항의 연결 상태에 따라 달라질 수 있으므로 새로운 오차 수정방법이 필요하다.

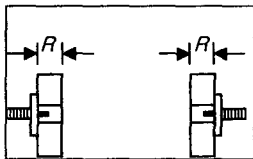
본 연구에서는 기존의 방법에서 발생할 수 있는 문제점을 해결하기 위하여 기존의 TRL 수정 방법에서 사용하는 표준 전송선 패턴 외에 하나의 패턴을 추가하는데, 표준 패턴의 "Line" 패턴 중간에 저항이 연결된 패턴을 사용한다. 본 연구에서 제안하는 추가적인 표준 패턴은 저항이 연결되는 부분이 끝이 아니고 전송선의 중간 부분이기 때문에 기생성분이 작으며 저항이 연결된 위치를 측정값으로부터 추출하여 사용할 수 있으므로 제작상의 오차를 제거할 수 있어 정확한 오차 수정이 가능하다. 본 논문에서 제안하고 있는 방법의 타당성을 증명하기 위하여 특성 임피던스가 45  $\Omega$ 인 마이크로 스트립 전송선을 이용하여 표준 전송선 패턴을 적용하여 보았다.

## II. 기존 방법 분석

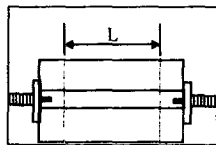
기존의 TRL 오차수정 방법에서는 그림 1에 나타낸 바와 같이 3 개의 표준 전송선 패턴에 대한 산란계수 (s-타라미터) 측정값을 이용하여 커넥터를 포함한 측정물 (DUT: Device Under Test) 까지 연결에 사용된 전송선의 특성을 수정할 수 있으며 수정과정에서 표준 전송선의 전파상수  $\gamma$ 를 구할 수 있다. TRL 방법의 문제점으로는 표준 전송선의 특성 임피던스  $Z_0$ 가 측정 시스템의 특성 임피던스  $Z_0$ 와 같아야만 정확한 오차 수정이 가능한 반면 기존의 TRL 방법으로는 표준 전송선의 특성 임피던스를 구할 수 없다. 기판위에 제작된 전송선의 특성 임피던스  $Z_0'$ 는 기판의 두께와 유전율 그리고 패턴의 선폭에 따라 달라지며 정확히 예측하기 힘들다. 따라서 새로운 표준 패턴을 추가로 도입하여 측정함으로써 표준 전송선의 특성 임피던스를 추출하는 방법이 제안되어 사용되고있다[2,3].



(a) Thru



(b) Reflect



(c) Line

그림 1. TRL 수정용 표준 전송선 패턴

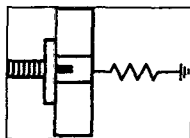


그림 2. 기존 방법에서 사용하는 추가 표준 패턴

새로운 표준 패턴으로 그림 2에 나타낸 바와 같이 전송선의 끝에 저항을 연결하여 사용하며 저항 값은 측정을 통해 정확히 알 수 있다. 기존의 TRL 오차 수정방법을 통해 커넥터와 저항까지의 전송선에 의한 영향을 제거할 수 있기 때문에 저항 단자에서의 반사계수를 구할 수 있으며, 이때의 반사계수는 측정 시스템의 특성 임피던스

$Z_0$ 를 기준으로 한 반사계수가 아니고 전송선의 특성 임피던스  $Z_0'$ 을 기준으로 한 반사계수이다. 따라서 알고 있는 저항값과 측정된 반사계수로부터 표준 전송선의 특성 임피던스를 계산 할 수 있다[3].

$$Z_0' \cdot \frac{1 + \Gamma_{load}}{1 - \Gamma_{load}} = Z_{load} \approx R_{load, dc} \quad (1)$$

이때 측정된 반사계수는 저항이 연결된 전송선 끝에서의 기생 성분이 포함된 값이므로 정확한 값이 아니며 주파수가 낮아질수록 기생성분의 영향은 줄어든다. 그러나 전송선의 특성 임피던스는 주파수의 함수이며 주파수가 낮아질수록 특정 주파수 이하에서는 급격히 증가한다[2]. 따라서 주파수에 따라 변하지 않는 값을 구하여 전송선의 특성 임피던스를 다시 계산하여야 정확한 특성 임피던스를 구할 수 있다.

전송선은 그림 3에 나타낸 바와 같이 단위 길이 당 직렬저항 R, 직렬 인덕턴스 L, 병렬 컨덕턴스 G와 커패시턴스 C를 이용하여 나타낼 수 있다. 단위 길이 당 직렬저항 R은 주파수가 높아지면 표면 효과(skin effect)로 인하여 증가하는 특성을 가지나, 단위 길이 당 병렬 컨덕턴스 G와 병렬 커패시턴스 C는 주파수와 무관하게 일정한 값을 가진다[3]. 전송선의 특성 임피던스  $Z_0$ 와 전파상수  $\gamma$ 는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\frac{\gamma}{Z_0} = j\omega C + G \quad (2)$$

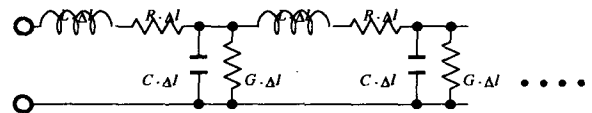


그림 3. 전송선의 미세 등가회로

식(1)과 식(2)를 이용하면 측정된 각각의 주파수에서 C와 G를 구할 수 있고 기생성분의 영향을 제거하기 위하여 fitting 하여 낮은 주파수 값을 선택한다. 이 방법은 저항을 연결하는 단자에서의 기생성분 영향이 크고, 저항의 연결 상태에 따른 전송선 길이 변화 때문에 오차가 생길 수 있다. 이러한 현상은 미세 제어가 가능한 MMIC에서는 무시할 수 있지만 PCB 기판을 이용할 경우에는 영향이 크다.

### III. 새로운 방법

본 논문에서는 기존 방법에서의 문제점인 저항 연결 상태에 따른 길이변화 문제와 기생성분 문제를 해결하기 위하여 TRL 표준 전송선 패턴에 그림 4와 같은 표준 전송선 패턴을 추가하여 사용하였다. 일반적인 TRL 방법을

이용하여 커넥터와 측정물까지 연결된 전송선의 영향을 제거할 수 있으며 다음 식들 (식 3~7)을 이용하여 각 단자에서 중간단 저항까지의 거리를 계산 할 수 있다.

$$S_{11} = \Gamma_0 \cdot e^{2\gamma L_1} \quad (3)$$

$$S_{22} = \Gamma_0 \cdot e^{2\gamma L_2} \quad (4)$$

$$\frac{S_{22}}{S_{11}} = e^{2\gamma(L_2 - L_1)} \quad (5)$$

$$L_2 - L_1 = \frac{\ln\left(-\frac{S_{22}}{S_{11}}\right)}{2\gamma} \quad (6)$$

$$L_1 + L_2 = L \quad (7)$$

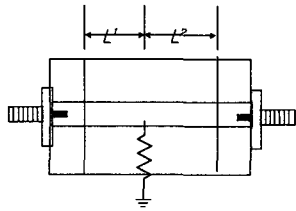


그림 4. 본 논문에서 사용하는 추가 표준 패턴

계산된 거리와 TRL 방법에서 알 수 있는 전파상수를 이용하여 중간단 저항이 있는 위치에서 반사계수  $\Gamma'$ 를 계산할 수 있으며 이때의 반사계수를 이용하여 표준 전송선의 특성 임피던스  $Z_0'$ 을 계산할 수 있다.

$$\Gamma' = Z_0' \frac{Z_t - Z_0}{Z_t + Z_0} \quad (8)$$

$$Z_t = R_a // Z_0 \quad (9)$$

$$Z_0 = \frac{-2 \Gamma' R_a}{1 + \Gamma'} \quad (10)$$

이때의 반사계수 역시 기존의 방법과 마찬가지로 저항이 연결된 위치에서의 기생성분의 영향이 포함되어 있으나 전송선이 불연속적인 기존 방법[2]에서의 기생 성분은 비해 연속적인 전송선을 사용하는 본 연구의 방법에서는 기생 성분을 무시할 수 있다. 따라서 측정 데이터를 fitting하지 않고 직접 표준 전송선의 특성 임피던스를 계산할 수 있다.

또한 본 논문에서 제안하는 방법을 사용하면 표준 전송선 패턴을 제작할 때 길이의 변화가 있더라도 측정에 의해 정확히 그 위치를 찾을 수 있어 오차를 줄일 수 있다.

#### IV. 비교 분석

본 논문에서 제안하는 오차수정 방법을 기존의 방법과

비교하여 검증하기 위하여 특성 임피던스 45 Ω 인 표준 전송선 패턴에 대하여 각각의 길이를 다음과 같이 두고 시뮬레이션 한 후 각각의 방법으로 특성 임피던스를 계산하여 비교하였다. 50 MHz에서 1 GHz까지의 주파수에서 분석하였으며 선택한 전송선의 길이는 이 주파수 범위에서 최적의 값으로 정했다[4].

T=5.5 cm, R=5.5 cm, L=5.5 cm

L1=2.5 cm, L2=3.0 cm

그림 5에 기존의 방법을 이용하여 계산한 표준 전송선의 특성 임피던스를 나타냈다. 각각의 측정 주파수에서 C값을 구하고 이를 이용하여 특성 임피던스를 구했을 때와 모든 주파수에서의 C 값을 fitting한 후 DC에서의 C 값을 사용하여 계산한 특성 임피던스를 보이고 있다. Fitting 하여 사용하는 것이 일반적인 전송선의 특성 임피던스와 유사한 특성을 가지며 각각의 주파수에서 특성 임피던스를 구하면 부정확한 값이 됨을 알 수 있다. 주파수가 낮아지면서 특성 임피던스가 증가하는 것은 전송선의 일반적인 특성이다.

그림 6에 길이오류에 의한 결과를 나타냈다. 5.5 cm로 설계한 전송선의 길이가 1 mm 증가하였을 경우에 대한 계산 결과를 비교하였다. 저항을 연결하는 위치가 정확하지 않으면 추출된 특성 임피던스에 오차가 생김을 알 수 있다.

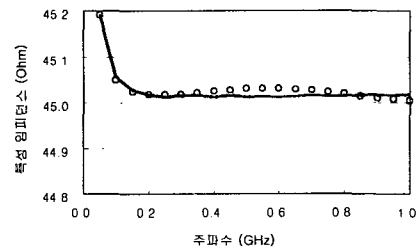


그림 5. 기존 방법의 특성 임피던스

-- : Fitting을 이용한 추출

O : 각 주파수 마다 계산

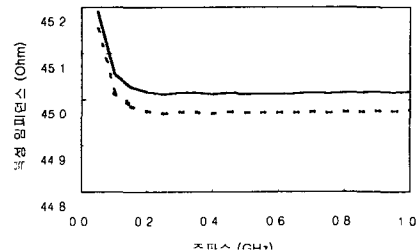


그림 6. 길이오차에 따른 특성 임피던스

— : 정확한 길이로 예측

- - - : 1 mm 오차

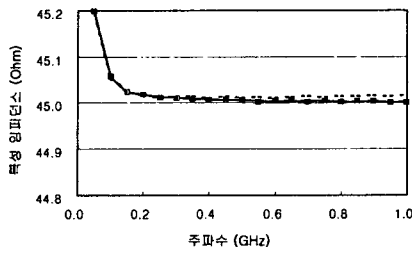


그림 7. 본 연구 방법의 특성 임피던스  
 — : 본 논문 방법 이용  
 - - : 본 논문 방법 (0.5 mm 오차)  
 . . : 기존 방법 이용

그림 7에 본 논문에서 제안하고 있는 방법을 사용한 결과를 앞의 두 결과와 비교하였다. 본 논문의 방법을 사용할 경우 길이 오차를 1 mm 변화시켰을 때 추출된 특성 임피던스는 변화가 없었으며 그 값도 예상 값 45 Ω에 근접해 있음을 알 수 있다.

#### IV. 결론

TRL 오차 수정방법은 기관 위에 제작된 고주파 소자를 측정할 때 많이 사용되는 방법이지만 오차 수정을 위해 제작된 표준 전송선 패턴의 특성 임피던스를 알아야만 보다 정확하게 측정 오차를 수정할 수 있다. 기존의 방법에서는 저항을 종단 처리한 표준 패턴을 추가로 이용하여 전송선의 단위 길이 당 커패시턴스를 계산하고 주파수에 대해 fitting하는 방법으로 표준 전송선의 특성 임피던스를 계산하고 있으나 제작상의 부정확성에 의해 추출된 특성 임피던스가 영향을 받고 있음을 확인하였다. 본 연구에서 제안하는 새로운 방법을 이용하면 fitting하는 과정 없이 각각의 측정주파수에서 직접 특성 임피던스 추출이 가능할 뿐 아니라 제작상의 부정확성을 측정결과로부터 처리할 수 있으며 검증 결과 기존 방법 보다 정확한 특성 임피던스를 추출할 수 있었다.

#### [ 참고문헌 ]

[1] ENGEN, G.F, and HOER, C.A, "Thru-Reflect-Line: An Improved technique for calibration of the dual six-port automatic network analyzer", IEEE Trans, MTT-27, pp. 987-993, 1979.

[2] R.B. Marks and D.F. Williams, "Characteristic Impedance Determination Using Propagation Constant Measurement", IEEE Microwave Guided Wave Letter, vol. 1, no. 7, pp. 141-143, June 1991.

[3] Dylan F. Williams and Roger B. Marks, "Transmission Line Capacitance Measurement", IEEE MTT, pp. 243-245, Sep. 1991.

[4] D. Kostevc, "Simple extension of TRL Calibration method of VANA", IEEE Electronics Letters, vol. 31, no. 8, pp. 634-634, 13th April 1995.

[5] Guillermo Gonzalez, Microwave Transistor Amplifiers Analysis and Design, Prentice Hall, 1984.