

논문 2008-45TC-12-21

Suspended Strip Line의 Open End 및 Step 불연속 효과에 대한 고찰

(A Consideration of Open End & Step Discontinuity Effects for
Suspended Strip Line)

전 용 구*, 양 승 인**

(Yong-Ku Jeon and Seung-In Yang)

요 약

Suspended Strip Line의 Open End와 Step 불연속 효과의 등가회로를 구하였다. 각 불연속 효과를 표현하는 회로정수들을 EM 해석 결과로부터 최적화한 후 수식으로 표현하였으며, 수식의 계수들은 모든 임피던스 경우에 맞도록 curve fitting을 통하여 구하였다.

Abstract

The equivalent circuits of Open End and Step discontinuity effects for Suspended Strip line are obtained. The circuit parameters for each discontinuity effect are represented by equations after optimization based on EM analysis results, and the coefficients of the equations are obtained by curve fitting for all impedance cases.

Keywords : suspended strip, discontinuity, open end, step, curve fitting, EM analysis

I. 서 론

마이크로파 회로를 실제로 구현할 경우 PCB 형태로 제작을 하는 planar 구조 방법이 보편화되어 있다. 이러한 planar 구조는 strip line, micro strip line, slot line, coplanar waveguide, suspended strip line, fin-line, image line 등이 있다^[1].

Strip line과 suspended strip line 구조는 제작하기 어렵지만, 유전 손실이 거의 없기 때문에 높은 Q값을 요구하는 회로에 적용할 수 있다. 이중 suspended strip line이 제작하기 더 쉽고 높은 Q값을 갖지만, strip line 처럼 특성임피던스, 불연속 효과 등과 같은 parameter 들이 수식으로 표현된 경우가 없다^[1-2]. 이는 회로 설계

후에 물리적인 모델로 구현하고, 제작하는 경우 오차를 발생시키는 원인이 될 수 있다. 특히, 불연속 효과가 회로 설계시부터 반영되지 않을 경우, 설계 의도와는 다른 결과를 초래할 수 있다.

본 논문에서는 strip line의 특성임피던스 수식을 Air-filled 보정을 통하여 suspended strip line의 도체폭 계산 시 적용하였다. 또한, 20GHz 주파수 범위까지 실제 제작을 감안하여, 적절한 EM 해석 공간과 물리적인 값들을 설정하였고, Open End와 Step 불연속 효과들을 SONNET EM tool을 이용하여 해석하였다. 특히, step 불연속 효과의 경우는 입력과 출력에 각기 다른 모든 임피던스를 적용하여 해석을 수행하였다. 그리고 각 불연속 효과들에 대해 적절한 등가회로 모델을 설정한 후, EM 해석 결과와 비교하여 회로정수의 값을 최적화하여 도출하였으며, 이 최적화한 결과들을 바탕으로, 모든 임피던스에 대해 사용할 수 있도록 curve fitting을 수행하여 수식들을 구하였다.

* 정회원, ** 평생회원, 송실대학교 정보통신전자공학부 (Soong Sil University)

※ 이 연구는 2008년도 송실대학교 대학 연구비의 지원으로 연구되었음.

접수일자: 2008년10월7일, 수정완료일: 2008년12월10일

II. Suspended Strip Line의 제작을 위한 물리적인 값 및 EM 해석 공간의 설정

Suspended Strip Line의 신호가 전송되는 횡단면의 구조는 그림 1과 같다. 여기서, s 는 유전체의 두께, t 는 도체의 두께, ϵ_r 는 유전체의 비유전율, W 는 도체 폭, b 는 윗측 도체와 아래측 도체 간의 거리이며, A 는 옆면 도체들 간의 거리이다.

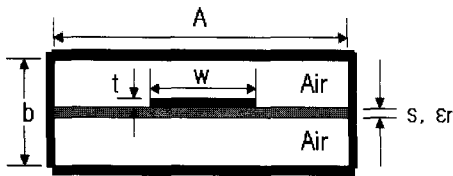


그림 1. Suspended Strip Line 구조
Fig. 1. Suspended Strip Line Structure.

본 논문에서 설정한 Suspended Strip Line 구조의 물리적인 값들은 다음과 같다.

$$A = 7.5\text{mm}, \quad b = 2.127 \text{ mm},$$

$$s = 0.127 \text{ mm}, \quad t = 0.018 \text{ mm}, \quad \epsilon_r = 2.22$$

위의 값들 중 A 를 7.5mm로 설정한 이유는 cavity resonance가 일어날 수 있는 최저 주파수가 21.97 GHz 이므로 20GHz 주파수 대역까지 회로 설계를 할 경우 문제가 없도록 했으며, 또한 A 값이 클 경우는 기판의 지지가 어렵기 때문에 제작이 쉽지 않게 된다.

Suspended Strip Line의 특성임피던스를 계산하는 수식은 closed form으로는 현재 존재하지 않지만, 위에서 설정한 물리적인 값들을 사용한 특성임피던스에 대한 계산은 Strip Line의 수식을 Air-filled 보정(즉, 유전체가 공기로 채워졌다고 가정하면 s 와 b 는 다른 값으로 치환됨)한 수식으로부터 구할 수 있다^[3]. 이 수식은 임의의 두께를 갖는 도체폭 W 가 주어졌을 때 특성임피던스를 구하는 수식이므로, 임의의 임피던스가 주어졌을 경우에는 해당 수식들을 이용하여 수치해석으로 도체폭을 구할 수 있다.

앞에서 설정된 물리적인 값들을 바탕으로 EM 해석 공간의 길이는 reference shift를 하여도 해석 결과에 영향을 미치지 않는 것으로 확인된 15mm로 설정하였다. 각기 다른 특성임피던스에 대해 수식으로 계산한 도체폭과 이 도체폭을 적용하여 EM해석한 임피던스와의 상대적 차이를 백분율로 비교한 것을 표 1에 나타내었다.

표 1. EM 해석한 특성임피던스 비교

Table 1. Comparison characteristic impedances with those by EM analysis.

Characteristic Impedance (Ω)	Conductor Width (mm)	Impedance by EM (Ω)	Relative Difference of Impedance (%)
200	0.134355	195.05	2.47
175	0.225939	173.37	0.82
150	0.370457	146.26	1.87
136.5	0.480814	134.5	1.00
125	0.59943	123.21	0.89
112.5	0.761856	111.24	0.63
100	0.970741	98.47	0.76
87.5	1.24434	86.91	0.29
75	1.613	74.29	0.35
62.5	2.13159	62.03	0.24
50	2.91067	49.97	0.02
43.25	3.51878	43.12	0.07
37.5	4.20951	37.44	0.03
35	4.58061	34.84	0.08
32.5	5.00881	32.31	0.09
30	5.50838	29.66	0.17
27.5	6.09878	26.7	0.40
25	6.80726	22.85	1.07

표 1에서와 같이 각 특성임피던스에 대해 EM 해석 결과는 2.5% 차이 이내이며, 불연속 효과 등을 포함한 회로 설계에 적용할 수 있다.

III. Suspended Strip Line의 Open End와 Step 불연속 효과에 대한 고찰

Strip line과 micro-strip line의 불연속 효과에 대한 고찰은 수식적으로 다루어진지 오래되었다^[1-2]. 현존하는 설계 tool들은 이 수식들을 바탕으로 다양한 회로 모델들을 갖고 있으나, suspended strip line의 경우는 전 무하다고 할 정도이다.

본 논문에서는 suspended strip line의 불연속 효과 중 open end와 step의 경우에 대해 고찰하였다. 각 불연속 효과를 구하기 위해 EM 해석 tool(SONNET)을 사용하여 표 1의 도체폭을 적용하여 해석을 하였다. EM 해석 시 Port Impedance는 50옴으로 설정하였고, 각 불연속 면까지 reference shift를 하여 s-parameter를 구하였다. 이렇게 얻어진 EM 해석 결과를 s2p 파일형태로 회로 해석 tool에서 불러들인 후, 등가회로의 정수들을 변수로 설정하고, 각각의 s-parameter 크기와 위상이 일치하도록 최적화 하였다. 이 결과로 부터 회로정수들이 모든

임피던스에서 사용될 수 있도록 curve fitting하여 수식으로 표현하였으며, 각 불연속 효과에 대한 고찰은 다음과 같다.

1. Open End 불연속 효과

전송선 끝단의 개방에 의한 Open end 불연속 효과인 경우에 대한 구조와 그 등가회로 모델은 그림 2와 같이 표현할 수 있다.

Open End 불연속 등가회로는 전송선의 개방된 단면에서 선로의 길이가 Δl 만큼 늘어난 것으로 표현하였다. 임피던스에 따른 등가 회로정수 Δl 에 대해 EM 해석 결과를 바탕으로 최적화한 결과와 수식으로 구한 결과를 그림 3에 나타내었으며 횡축은 특성임피던스 Z 를 50옴으로 정규화한 것이다. 그림 3에서 Δl 계산 시 사용한 수식은 식 (1)과 같으며, 최적화한 결과와 수식 계산 결과가 거의 일치함을 확인할 수 있다.

$$\Delta l = -0.0723(Z/50) + 0.5598 \tag{1}$$

수식에 대한 검증은 위하여 임피던스가 80옴인 경우, EM 해석과 수식으로 계산한 결과를 등가회로에 적용하

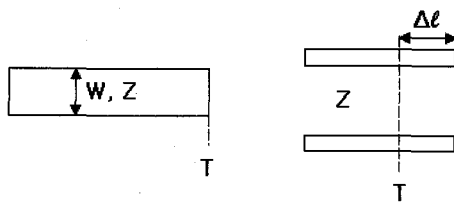


그림 2. Open End 불연속 효과 구조와 그 등가 회로
Fig. 2. Open end discontinuity effect and its equivalent circuit.

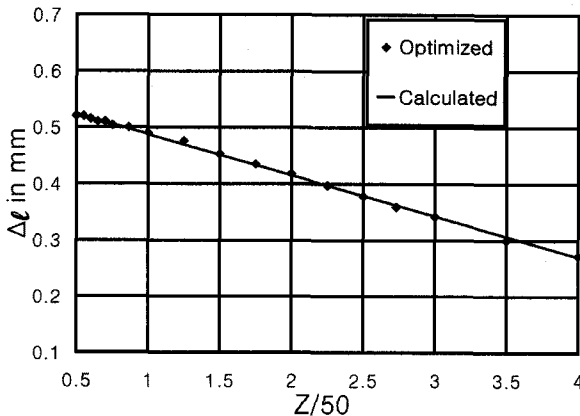


그림 3. Open End 불연속 효과의 등가 회로정수 Δl 의 최적화 결과와 수식 계산 결과

Fig. 3. Results optimized and calculated by equ. of equivalent circuit element, Δl for open end discontinuity effect.

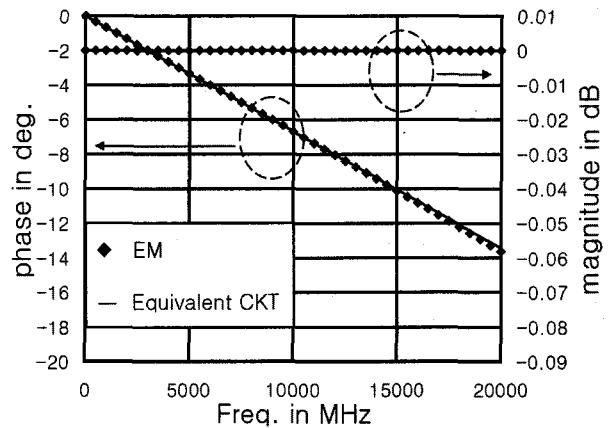


그림 4. Open End 불연속효과에 의한 S11의 비교 ($Z=80\Omega$)
Fig. 4. Comparison of S11 for open end effect ($Z=80\Omega$)

여 S_{11} 을 서로 비교한 것이 그림 4이며 거의 일치함을 확인할 수 있다.

2. Step 불연속 효과

각각 다른 특성 임피던스를 갖는 전송선이 연결되는 Step 불연속 효과인 경우에 대한 구조와 그 등가회로 모델은 그림 5와 같이 표현할 수 있다.

Step 불연속 등가회로는 연결된 부분 중 도체폭이 넓은 쪽의 일부 개방된 단면에서 발생하는 효과를 의미하는 C와 최적화 과정에서 구한 L, 전송선으로 표현하였고 연결된 임피던스 중 그 크기가 작은 쪽에 C가 위치하도록 설정하였다. 각 임피던스 조합에 따른 회로 정수들에 대해 EM 해석 결과를 바탕으로 최적화한 결과와 수식으로 구한 결과를 비교하였으며, 최적화 시 전송선의 길이 l은 큰 변화를 보이지 않아 고정 값인 0.01 mm를 사용하였다. 많은 결과들 중에서 Z_1 이 50옴인 경우에 대해서만 회로 정수 L과 C에 대한 최적화한 결과와 수식으로 계산한 결과를 나타낸 것이 그림 6이며 횡축은 임피던스 Z_2 를 임피던스 Z_1 으로 정규화한 것이며,

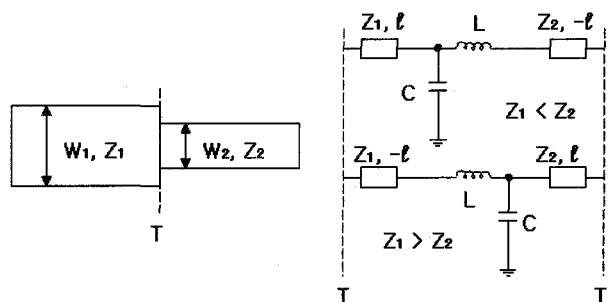
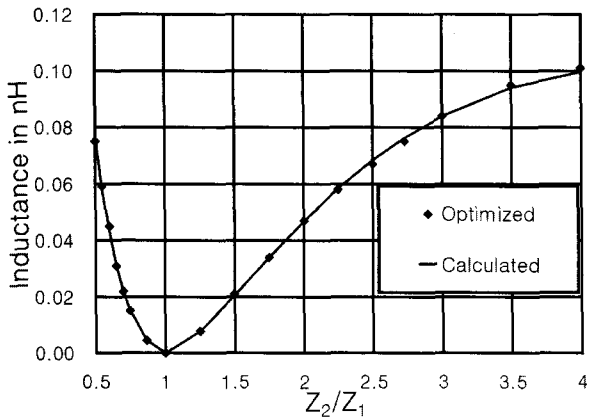
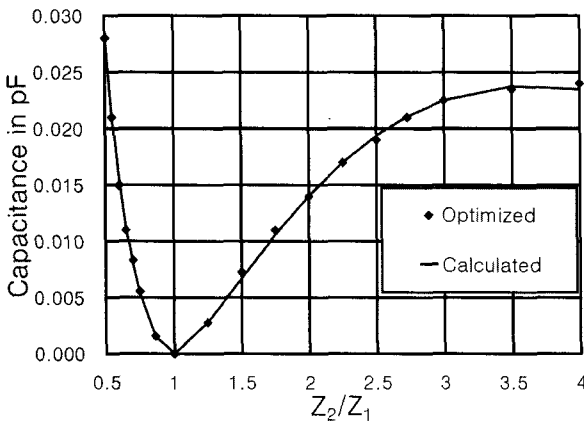


그림 5. Step 불연속 효과 구조와 그 등가 회로
Fig. 5. Step discontinuity effect and its equivalent circuit.



(a)



(b)

그림 6. (a) Step 불연속 효과의 등가 회로정수 L의 최적화 결과와 수식 계산 결과 ($Z_1=50\Omega$)
 (b) Step 불연속 효과의 등가 회로정수 C의 최적화 결과와 수식 계산 결과 ($Z_1=50\Omega$)

Fig. 6. (a) Results optimized and calculated by equation of equivalent circuit element L for step discontinuity ($Z_1=50\Omega$)
 (b) Results optimized and calculated by equation of equivalent circuit element, C for step discontinuity ($Z_1=50\Omega$).

두 결과는 거의 일치함을 알 수 있다.

그림 6에서 L과 C에 대한 계산시 사용한 수식은 식 (2)와 같으며, 일반 다항함수에 비해 Logarithmic 함수를 사용하면서 차수가 줄었으며, 회로 정수에 대한 수식의 계수들은 다항함수로 표현되지 않아 표 2에 나타내었다.

$$x = Z_2/Z_1$$

$$L \text{ or } C = \begin{cases} a_1 \ln^2(x) + a_2 \ln(x), & \text{for } x < 1 \\ p_1 \ln^3(x) + p_2 \ln^2(x) + p_3 \ln(x), & \text{for } x \geq 1 \end{cases} \quad (2)$$

수식에 대한 검증을 위하여 임피던스 Z_1 이 50옴, Z_2 가 80옴인 경우에 대해 EM 해석과 수식으로 계산한

표 2. (a) Z_1 에 따른 회로정수 L에 대한 수식 계수
 (b) Z_1 에 따른 회로정수 C에 대한 수식 계수
 Table 2. (a) Coefficients for circuit element L over Z_1 .
 (b) Coefficients for circuit element C over Z_1 .

(a)

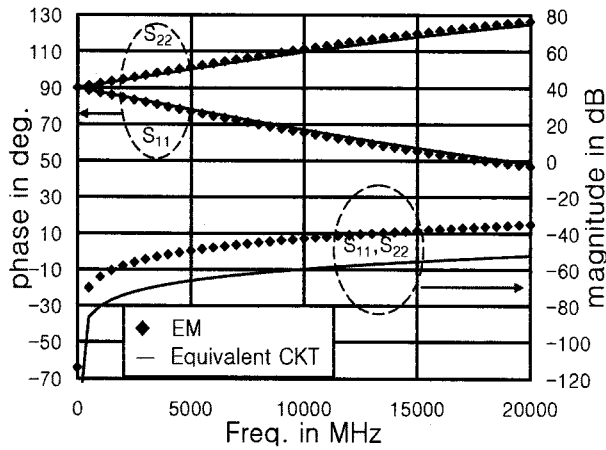
Z_1	a_1	a_2	p_1	p_2	p_3
200	0.04318	0.003435	0	0	0
175	0.04813	0.002086	0	0	0.00974
150	0.05183	-0.001723	0	0.04015	0.00915
136.5	0.05686	-0.00165	-0.058	0.0585	0.00956
125	0.06233	-0.00144	-0.0859	0.07574	0.00842
112.5	0.06761	-0.002183	-0.0841	0.08736	0.00712
100	0.07207	-0.004022	-0.0493	0.06804	0.01113
87.5	0.08024	-0.005662	-0.047	0.07204	0.01129
75	0.0907	-0.006384	-0.05	0.08174	0.01206
62.5	0.1102	-0.005901	-0.0456	0.08362	0.01546
50	0.1472	-0.009289	-0.0544	0.1193	0.01101
43.25	0.1938	-0.001398	-0.0325	0.07423	0.03193
37.5	0.2461	0.001146	-0.0281	0.07003	0.03616
35	0.2687	-0.001734	-0.0283	0.07165	0.03973
32.5	0.3272	-0.001605	-0.0223	0.05972	0.05037
30	0.3776	-0.007945	-0.0228	0.05947	0.05688
27.5	0.2231	-0.03813	-0.0212	0.0558	0.06714
25	0	0	-0.022	0.0557	0.08303

(b)

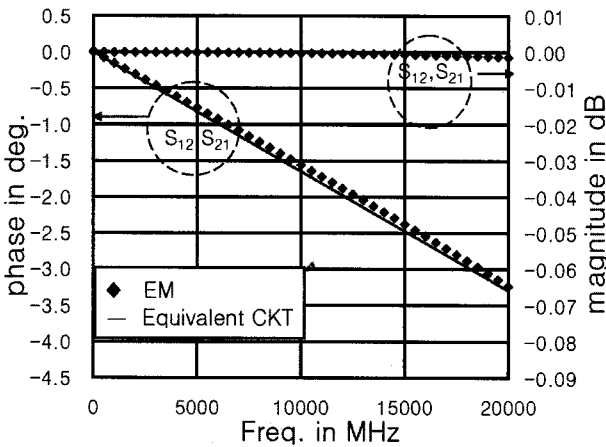
Z_1	a_1	a_2	p_1	p_2	p_3
200	0.0121	-0.002371	0	0	0
175	0.01384	-0.002432	0	0	0.00681
150	0.01522	-0.003587	0	0.01148	0.00233
136.5	0.01706	-0.003315	-0.0209	0.02152	0.00173
125	0.0191	-0.003285	-0.0313	0.02829	0.00144
112.5	0.02116	-0.003813	-0.0376	0.03618	0.00081
100	0.02385	-0.003672	-0.0245	0.02836	0.00257
87.5	0.0275	-0.004264	-0.0201	0.02736	0.00309
75	0.03367	-0.004076	-0.0192	0.02828	0.00398
62.5	0.04283	-0.003815	-0.0181	0.02828	0.0056
50	0.05396	-0.002993	-0.0185	0.03355	0.00589
43.25	0.07829	-0.002697	-0.0084	0.01563	0.01574
37.5	0.1	-0.001377	-0.0089	0.01757	0.01685
35	0.1083	-0.002184	-0.0043	0.00597	0.02547
32.5	0.1364	-0.001534	-0.0058	0.01041	0.02445
30	0.1559	-0.004303	-0.0065	0.01145	0.02716
27.5	0.1276	-0.01326	-0.0061	0.00979	0.03216
25	0	0	-0.0033	0.0008	0.04288

결과를 등가회로에 적용하여 s-parameter 들을 비교한 것이 그림 7이며, 수식 계산시 계수들은 표 2를 참조하였다.

그림 7에서 EM 해석 결과와 등가회로를 적용한 결과는 S_{11} , S_{22} 의 크기를 제외하고는 거의 일치함을 보이



(a)



(b)

그림 7. (a) Step 불연속 효과에 의한 S_{11} , S_{22} 의 비교 ($Z_1=50\Omega$, $Z_2=80\Omega$)
(b) Step 불연속 효과에 의한 S_{12} , S_{21} 의 비교 ($Z_1=50\Omega$, $Z_2=80\Omega$)

Fig. 7. (a) Comparison of S_{11} , S_{22} for step discontinuity effect ($Z_1=50\Omega$, $Z_2=80\Omega$)
(b) Comparison of S_{12} , S_{21} for step discontinuity effect ($Z_1=50\Omega$, $Z_2=80\Omega$).

며, 반사계수인 경우 절대값의 관점에서 볼 때 매우 작은 수준에서 차이가 나는 경우이므로 거의 차이가 없다고 해도 무방할 것이다.

IV. 결 론

특성 임피던스가 주어질 경우 설정한 물리적인 값들을 사용한 도체폭의 계산은 Strip Line 구조의 수식을 Air-filled를 통하여 보정한 것을 사용하였다. 계산된 도체폭을 적용한 EM 해석 결과는 그 상대적 차이가 2.5% 이내이므로 회로 설계에 적용할 수 있다.

Open end 불연속 효과에 대한 등가 회로는 선로 길

이가 Δl 만큼 늘어나는 것으로 표현하였으며, curve fitting 결과 특성 임피던스에 대한 일차식으로 표현되었다. Step 불연속 효과에 대한 등가 회로는 L과 C, 전송선으로 표현하였으며, 최적화시 전송선의 길이는 거의 변화가 없었기 때문에 고정된 값 0.01mm를 사용하였다. L과 C는 각각 연결된 임피던스 Z_1 , Z_2 의 비례에 따라 자연로그 함수의 2차항 또는 3차항으로 표현되었고, 수식의 계수들은 표로 나타내었고, 선형 보간법을 사용하면 다른 임피던스에 대해서도 사용할 수 있다. 각 불연속 효과에 대한 최적화한 결과와 수식 계산한 결과는 거의 일치함을 보이므로, 해당 수식들을 회로 설계에 바로 적용할 수 있다. 또한, 수식에 대한 검증을 위하여 $Z_1=50\Omega$, $Z_2=80\Omega$ 인 경우, EM 해석 결과와 등가 회로 해석 결과를 s-parameter를 비교하였으며 거의 일치함을 보였다.

본 논문에서 고찰한 Open end 및 Step 불연속 효과 외에 Coupled gap, T-junction 등과 같은 효과들을 추가적으로 고려하고, 이 결과들을 Suspended Strip Line 구조로 설계되는 회로에 적용하면 초기 회로 설계에서부터 제작 결과를 미리 예측할 수 있게 되므로, 시간에 대한 절약과 보다 정확한 결과를 얻을 수 있게 될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Inder Bahl, Parakash Bharita, *Microwave Solid State Circuit Design*, A Wiley-Interscience Publication, JOHN WILEY & SONS, 1988.
- [2] H. M. Altschler, A. A. Oliner, "Discontinuities in the Center Conductor of Symmetric Strip Transmission Line", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, pp. 328-339, Vol. 8, May 1960.
- [3] 전용구, 양승인, "실제 제작을 고려한 Suspended Strip Line의 특성임피던스와 불연속 효과에 대한 고찰", *2008년도 춘계 마이크로파 및 전파전파 학술대회 논문집, 동국대학교*, pp. 115~118, Vol. 26, May 2008.

저 자 소 개



전 용 구(정회원)

1991년 숭실대학교
전자공학과 학사 졸업

1993년 숭실대학교
전자공학과 석사 졸업

1999년~현재 숭실대학교
전자공학과 박사과정

1993년~2002년 단암전자통신 연구소 RF 개발팀

2002년~2004년 텔웨이브 무선기술사업부
방산개발팀

2004년~2005년 링스웨이브 연구소 개발팀

2006년~현재 M&M링스 연구소 RF 개발팀

<주관심분야 : 초고주파 회로 및 시스템 설계>



양 승 인(평생회원)

1974년 서울대학교 전기공학과
학사 졸업

1976년 KAIST 전기 및
전자공학과 석사 졸업

1987년 KAIST 전기 및
전자공학과 박사 졸업

1978년~현재 숭실대학교 IT대학 전자통신전자
공학부 교수

<주관심분야 : 초고주파 회로 설계, 고이득 안테
나, 전자파 산란>