

Microwave Circuit Simulation

羅 克 煥

光云大學校 工科學 電子工學科 副教授

I. 서 론

스트립라인은 일찌기 1949년에 도입되어 1955년에는 그에 대한 전송선로로서의 해석, coupled line의 상호 임피던스, radiation 효과, 불연속들에 대해 비교적 상세히 알려졌을 정도로 많은 관심을 끌었지만 실제 초고주파 회로설계에 있어서는 별로 인기가 없었다. 그 이유는 저손실 유전체가 개발되어 있지 못했을 뿐만 아니라 당시에 가용했던 능동 및 수동소자의 물리적 크기가 매우 커서 선로와의 임피던스 정합이 어려웠기 때문이었다.

그 이후 1965년까지 tunnel diode, mixer diode, varacter diode, switching diode 등의 반도체 소자들이 점차로 사용되다가 1965년부터는 초고주파 트랜지스터, TED's, avalanche diodes 등의 반도체 전원소자들과 Schottky-barrier diode와 pin diode 등이 수신기와 제어용으로 사용되게 됨으로써 마이크로스트립을 사용할 수 있게 되었다.

특히 1960년대 초반부터 개발되어진 phased array radar의 경우, 수많은 진공관 소자들을 안테나에 배열하고 있기 때문에 너무 무겁고 부피가 커서 비행기나 미사일등에 사용하기가 불편하기 때문에 1960년 중반부터 미국의 몇몇 레이더 제작 회사와 정부출연 연구소에서 소형화된 반도체 phased array radar를 개발하기 시작한 것이 MIC(microwave integrated circuit)의 탄생을 가져오게 된 것이다.

MIC를 위해 사용되는 기술은 저주파를 위한 사진식판기법, 증착이나 sputtering 같은 thin film technology와 thick film technology가 모두 그대로 적용되며 HMIC(hybrid MIC)와 MMIC(monolithic MIC)의 형태로 나뉘어진다. HMIC의 경우에는 수동회로를 포함하고 있는 세라믹, 유리, 또는 페라이트 기

판에 붙여지게 되고, MMIC의 경우에는 능동 및 수동소자가 모두 반도체 기판에 성장되게 된다.

스트립라인에 관한 초창기 해석방법으로는 1950년대에 광범위하게 사용되어져 왔던 conformal mapping technique이 있었으나 inhomogeneous한 스트립라인의 구조 때문에 적용이 불편했었고 1965년에 Wheeler에 의해 filling factor의 개념을 도입한 modified conformal mapping method가 개발되어 근사적이지만 상당히 정확한 해를 얻을 수 있었다. 이러한 상태에서 스트립라인에 관한 연구를 활발하게 만들어 준 몇가지 요인이 있는데 그 하나는 고속 디지털 컴퓨터가 가용하게 된 것이고 또 하나는 점점 수 GHz 이상 높은 주파수에서의 스트립라인의 사용이 증가하였다는 것이다.

그리하여 개발된 스트립라인의 해석방법으로는 맨 먼저 전파모드를 순수한 TEM으로 간주하는 Quasi-static technique이 있는데 이는 수 GHz 미만의 낮은 주파수 범위에서만 적용될 수 있으며, 두번째로는 선로의 inhomogeneous한 구조로 인해 발생하는 non-TEM 성질, 즉 주파수에 따른 유효 유전율의 변화를 고려한 dispersion model들이 있다. 그러나 좀더 높은 대역에 대해 정확한 결과를 얻으려면 시간적으로 변화하는 전자계를 고려한 파동방정식을 풀음으로써 정전용량이 아니라 전파상수를 구하게 되는 fullwave analysis를 해야한다. 이와같은 fullwave analysis는 여러가지 회로 설계나 다양한 optimization을 하기에 너무 복잡하고 대형컴퓨터로도 많은 시간을 요하여 불편하기 때문에 아직까지는 연구실 수준에서만 사용되고 있다.

회로를 tuning 하거나 trimming 할 수 있는 가능성은 지극히 제한되어 있고 날이갈수록 MIC의 개발

은 경쟁적으로 증가하는 추세이어서 결과적으로 analysis simulation과 optimization을 통한 지극히 포괄적이고도 정확한 설계과정이 요구되게 되었다. 또한 direct synthesis method가 필터나 transformer 같은 특정회로의 설계에 문제없이 응용될 수 있기는 하나 이에는 수학적 모델이 가능한 소자들만이 사용될 수 있으므로 적용범위가 극히 제한되어 있다. 그보다 실질적인 방법으로 직접 측정된 데이터를 가지고 범용 CAD 프로그램을 사용할 수 있는데 이 경우에 설계자는 회로를 반복적으로 해석할 수도 있고 요구되는 특성을 얻을 때까지 제반 파라메타를 변화시킬 수도 있다. 오늘날에 와서는 semi-insulating GaAs substrate를 사용하는 순수한 monolithic MIC가 개발됨으로써 yield figure도 개선되었고 저주파에서의 실리콘 IC에 준하는 특성을 갖게 되었으며, 그러한 MIC의 시장이 꾸준히 성장해오고 있을뿐 아니라, 컴퓨터 사용에 있어 그 비용이 급격하게 감소하고 있어 고속, 대용량이고 간편한 컴퓨터가 언제 어디서나 가용하게 되었기 때문에 초고주파 CAD의 지속적인 개발에 대한 중요성이 증대되고 있다.

이러한 관점에서 초고주파 CAD를 통한 회로설계에 있어서의 현황과 문제점들을 단계별로 살펴 보기로 한다.

II. Microwave Circuit Analysis

1. 역사적 고찰

1974년에 Monaco와 Tiberio가 회로를 임피던스나 어드미턴스, 그리고 S-파라메타로 나타내어 상호관계를 topological matrix에 의해 정의한 것은 초고주파 회로해석에 있어 하나의 이정표라 할 수 있다.

스캐터링 파라메타는 집중정수회로나 분포정수회로에 공히 적용되는 일반성이 있기 때문에 외부회로에 대한 해당 MIC 회로의 특성을 해석하는 일은 바로 multiport scattering matrix와 topological matrix를 정의하는 과정이 된다. 그 당시 회로소자들의 모델은 지극히 초보적인 단계였지만, 오늘날 MIC의 해석을 위해 사용되는 대부분의 테크닉도 이미 그 시기에 Monaco와 Tiberio에 의해 기술되었다. 또한 그들에 의해 제안된 subnetwork growth algorithm으로부터 syntax-oriented topology가 개발되어 큰 회로를 해석함에 있어 덩치큰 matrix를 취급할 필요가 없어졌다. 이는 MIC내의 대부분의 상호연결이 2-port를 직렬 연결함으로써 실현시킬 수 있다는 사실을 이용한 것이라 볼 수 있다.

1978년에는 Jansen에 의해 branching이나 3-port를 취급할 수 있는 알고리즘도 개발되었다.¹¹⁾ S-parameter를 기본으로 한 general syntax-oriented network reduction scheme은 이미 계산효율이 입증되었으며,¹²⁾ 이것은 상용 초고주파 CAD 프로그램인 SUPERCOMPACT와 TOUCHSTONE에서 사용되고 있다.

특히 초고주파 회로의 optimization 과정은 지극히 nonlinear해서 일반적으로 수 많은 local minima가 존재하기 때문에 optimal point를 찾기 위해서는 설계자와 컴퓨터사이의 interactive한 과정이 요구되므로 syntax-oriented analysis algorithm은 앞으로도 MIC 설계에 매우 유용하리라 믿어진다. 또한 이 알고리즘은 효율이 높고 요구되는 컴퓨터의 기억용량이 작아서 값이 싼 작은 컴퓨터상의 CAD 도구로 적합하다고 할 수 있을 것이다. 그러나 아직은 MIC의 해석에 있어 미해결의 문제가 남아 있다. 그것은 임의의 MIC 구조를 나타내는 회로가 순수하게 수동회로인 경우까지도 그 데이터가 오로지 근사적일 수 밖에 없다는 것이다. 마이크로스트립 같은 MIC 선로상의 hybrid mode 전송과 개방되어 있는 구조때문에 주파수가 증가할수록 이 문제는 더욱 심각해진다. 이와 관련하여 특성임피던스가 주파수에 따라 변하는 현상에 관하여 논의된 바가^{13),14)} 있는데, 그 참고 문헌들에 의하면 설계하는 관점에서 보았을 때 특성임피던스의 power-current 정의가 TEM-type 해석에서는 가장 좋은 결과를 줄 수 있음이 밝혀졌다.

2. Analysis Algorithms

일반적으로 초고주파회로는 단자의 수로 분류할 수 있는데 그중 가장 보편적인 것이 2-단자회로이며, 설령 그것이 복잡한 구조를 가지고 있다 하더라도 그것을 간단한 2-단자회로들의 직렬연결로 대체할 수가 있다. 3-단자회로로는 power splitter, circulator 등을 들 수 있으나 별로 그 수가 많지 않으며, hybrid나 directional coupler와 같은 4-단자회로는 더욱 몇가지 안되는 정도이다. 따라서 선택된 회로해석방법은 주로 2-단자를 다루게 되면서 4-단자까지도 처리할 수 있는 것이어야 할 것이며 그러한 analytical method들을 어떻게 효율적으로 이용하느냐가 초고주파 CAD의 승패를 좌우한다고 볼 수 있다.

초고주파 회로 해석방법을 다음과 같이 분류할 수 있다.

(1) Direct analytical method

(2) Matrix method

- ① Transfer matrix method
- ② Generalized scattering parameter method
- ③ Transfer scattering parameter method

Direct analytical method는 일단 개발되면 변수를 변화시켜 가면서 요구조건이 만족될 때까지 반복적으로 해석할 수 있도록 프로그램될 수 있지만 회로의 해석을 위해서 반드시 analytical expression이 필요하고 분포정수회로의 경우에는 그 모호한 특성때문에 어려움이 생긴다.

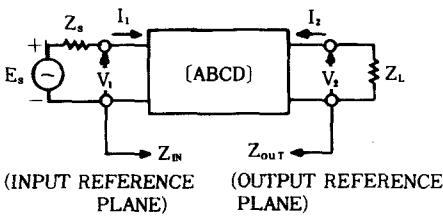


그림 1. Chain matrix(ABCD) representation for a two-port network.

Transfer matrix method의 경우에는 그림 1 과 같이 대부분의 회로를 “Black box”로 두고 각 단자의 전압, 전류를 정의하여 ABCD 파라미터를 이용한다. 따라서 이 2-port 회로는 다음과 같은 행렬식에 의해 완전히 기술될 수 있으며 이는 다른 2-port와 직접접속시에 아주 유용하게 되므로 일명 chain matrix라 한다.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ -I_2 \end{bmatrix}$$

그러나 이와같은 ABCD-파라미터는 전압과 전류에 의해 정의되고 따라서 그의 측정을 위해서는 각 단자의 완전개방 또는 완전단락을 필요로 하며 또 이

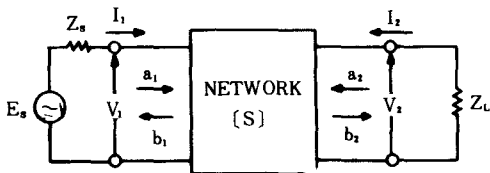


그림 2. Scattering parameter representation for a two-port network.

것은 저주파와 달리 초고주파 주파수에서는 매우 실현시키기 어려운 입장이므로 측정되지 않는 단자를 항상 특성 임피던스(50Ω)으로 정합시키는 스캐터링 파라미터가 훨씬 더 바람직하다고 볼 수 있을 것이다. (그림 2)

그와 같은 general scattering parameter method는 다음과 같은 행렬식으로 나타내진다.

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = [S] \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}$$

여기에 transfer matrix method의 개념을 결합시킨 것이 transfer scattering parameter method이고, 따라서 위 식의 배열을 다르게 함으로써 아래식을 얻는다.

$$b_1 = T_{11}a_2 + T_{12}b_2$$

$$a_1 = T_{21}a_2 + T_{22}b_2$$

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_2 \\ b_2 \end{bmatrix}$$

이 T파라미터와 S 파라미터 사이에는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$T_{11} = \frac{-S_{11} S_{22} - S_{12} S_{21}}{S_{21}} \quad T_{21} = -S_{22}/S_{21}$$

$$T_{22} = S_{11}/S_{21} \quad T_{12} = 1/S_{21}$$

Ⅲ. 초고주파 회로의 최적화

오늘날 가용한 초고주파 회로분석, 합성, 최적화를 위한 subroutine은 수 없이 많이 개발되어 있다. 특히 optimum seeking subroutines중에 우아하고 세련된 gradient method를 사용하지만 적용범위가 좁은 것으로부터 비록 heuristic search technique을 이용하지만 많은 문제들에 적용할 수 있는 것등 아주 다양하다.

일반적으로 초고주파 회로설계에 있어 설계자의 직관력은 필수적이듯이 CAD의 효율적인 운용을 위해서도 중요한 요소로써, 컴퓨터가 소자값을 수정하는데 있어서는 아주 능률적이지만 circuit topology를 적절히 선택하는 문제는 여전히 설계자의 능력에 달려 있다. 이 topology의 적절한 선택은 물리적으로 쉽게 실현 가능한 소자들을 가지고 목적으로 하는 기능을 충족시키는데 있어 필수불가결한 것이다. 또한

프로그램의 자유도가 커질수록 명령은 간단해지는 반면에 man-machine interface는 더 비효율적이 되며 일반적으로 high speed computer 내에서는 mis-guided 될 확률이 훨씬 더 크기 때문에 결국 설계자의 설계 취지와는 멀어지게 된다.

이와 같이 회로를 실현시키는 입장에서 보았을 때 human guidance가 없는 optimization은 불가능하며 따라서 optimization routine은 여러가지 엄격한 조건하에 선택적으로 감독이 되도록 하여야 할 것이다.

Optimization process의 효율적인 감독을 위해서는 적절한 performance evaluation function이 선택되어야 하고 이는 현재 가용한 응답과 최종목표로 하는 결과와를 비교하는 기준으로 적합해야 한다. 그러한 것으로는 mean square error나 Tchebyshev error 같은 error function들이 있고 optimization process는 이들 함수를 최소화시키는 과정이 되는 것이다.

이러한 optimization 과정은 수많은 local minima뿐 아니라 일반적으로 변수의 수가 많아서 매우 긴 시간을 필요로 한다. 이를 위해 개발된 optimization 프로그램중에 잘 알려진 것으로는 DEMON(diminishing error method of optimization for networks)등이 있다.

IV. 초고주파 CAD

오늘날의 초고주파 CAD의 기본적 개념은 1960년 대 말의 초고주파 트랜지스터와 관련된 MIC 기술이 본격적으로 개발되면서부터 약 10여년동안 대부분 정립이 되었으며,^[1] 이 개념은 소자들의 characterization을 제외하고는 기존의 저주파 IC에 대한 CAD 기술과 크게 상충되지 않는다.

다만 저주파의 경우 시간영역에 있어서의 해석이 큰 비중을 갖게 되는데 비해 초고주파의 측정과 해석은 주로 주파수 영역에서 이루어지며 스캐터링 파라미터를 이용하는 차이가 있으나, topology 자체는 저주파 회로의 경우에 비해 상당히 간단한 편이다.

초고주파 회로를 CAD에 의해 설계하는 과정을 6 단계로 구분하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

- (1) Element and device characterization
- (2) Element, device and component modeling
- (3) Statistical methods, intergrated design approach
- (4) Simulation and circuit analysis
- (5) Interactive user controlled optimization
- (6) Layout and mask generation

이러한 과정들은 각각 별도의 독립된 분야로서 연

구되면서 포괄적인 CAD를 위하여 서로 결합되어 사용된다. 이들중 첫번째 단계는 전송선로라든가 불연속, 집중정수 또는 분포정수 수동소자, 그리고 제한 능동소자들 모두에 대한 신뢰도 높고 정확한 데이터를 얻어내는 과정으로서 정밀한 수치해석이나 computer-aided measurement 등의 방법에 의해 이루어진다. [그림 3]

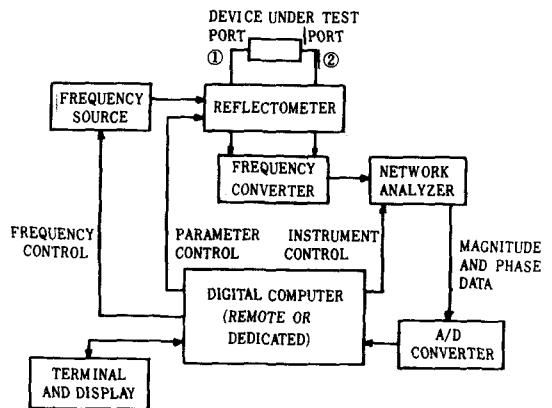


그림 3. Computer controlled network analyzer data acquisition system.

얼마전까지 초보적인 MIC 구조를 실험적으로 연구하기 위해서 resonance method가 광범위하게 쓰여 왔으나 오늘날에는 ANA(automatic network analyzer)와 computer-corrected S-parameter measurement techniques가 device characterization에서 이미 필수 불가결한 것으로 인정받고 있다. 두번째로 모델링의 분야에서는 1975년에 많은 발전이 있어 Hamerctad와 Bekkadai에 의해 마이크로스트립 핸드북이 출판되었다. 약 12GHz 이하의 주파수 대역에 있어 마이크로스트립의 불연속 및 접합을 모델링하기 위해 magnetic wall waveguide model이 사용되었고 BJT와 FET 같은 능동소자에 대한 저주파 소신호 모델을 수정하여 초고주파 영역에 응용하도록 하였으며 이들의 nonlinear한 특성에 대하여는 CAD를 위해 사용할 수 있을 정도로 약간의 모델이 개발되었다.

현재 상용으로 나와있는 초고주파 CAD를 위한 large scale program으로는 Compact Software Inc.에서 이전에 개발해 왔던 COMPACT를 1980년에 대

폭 개조하여 만들어낸 SUPERCOMPACT가 있고 COMPACT의 개발에 참여 하였던 일부 연구원들이 EEsof Inc.를 통해 TOUCHSTONE을 개발해 내어 이 두 프로그램이 전 세계적으로 거의 모든 초고주파 연구실 및 기업에서 널리 이용되고 있다.

V. Nonlinear Modeling

오늘날 대부분의 MIC 설계를 위한 CAD는 linear한 small-signal device models을 이용하고 있으나 monolithic MIC의 경우 또는 high power design의 경우에는 항상 nonlinear한 특성을 고려하여야 하며 특히 가장 중요하다고 생각되는 GaAs MESFET는 지극히 nonlinear한 특성을 갖는 능동소자로서 많은 사람들이 그를 모델링하는 문제에 매달려 왔으나 nonlinear microwave CAD는 아직까지도 유치한 수준이라 말할 수 있다.

1952년에 IRE에 발표된 Shockley의 FET 모델에서는 속도의 포화현상이 전혀 고려되지 못했었고 1968년에 와서야 Turner와 Wilson이 이 현상을 소신 호모델에 연관지어 설명했다. 그 뒤로 Lehocvec, Zuleeg, Shur, Eastman, Grebene, Ghandhi, Pucel, Hans, Statz 등에 의해 nonlinear analytical model들이 개발되어 왔으며 Monte Carlo analysis나 Poisson 방정식과 반도체내의 transport equation을 결합한 numerical 2-dimensional model과 특정 바이어스점에서의 S-parameters로 나타내는 empirical model이 1979년에 Willing과 Rauscher에 의해 개발되었다.

그러나 이와같은 모델들은 대체로 많은 CPU time을 필요로 하기 때문에 포괄적인 circuit simulation program에는 적합하지 못하다. 따라서 복잡한 회로를 함당한 시간내에 simulation하기 위해서는 아주 간단한 모델이 필요하게 되고 그에 부응한 첫 번째 것으로 1973년에 R. V. Tuyl이 개발한 GaAs IC large-signal MESFET model이 있으며 이는 프로그램 ASTAP에서 채택되었다.

이 analytical model은 H. Yeager와 D. Roat에 의해 개선되어 SPICE 프로그램에서 응용되고 있으나 아직도 정밀도나 주파수 의존도등의 면에서 완벽하지 못하여 계속 연구 중이다.

이와같이 GaAs MMIC에 적용할 수 있는 nonlinear active device model의 개선과 그에 따른 nonlinear simulator에 관한 연구는 계속될 것이지만 근본적으로 안고 있는 여러 문제들 때문에 과연 정확도 높은 이상적인 모델이 존재할 것인가는 의문시 되어 진다고 하겠다.

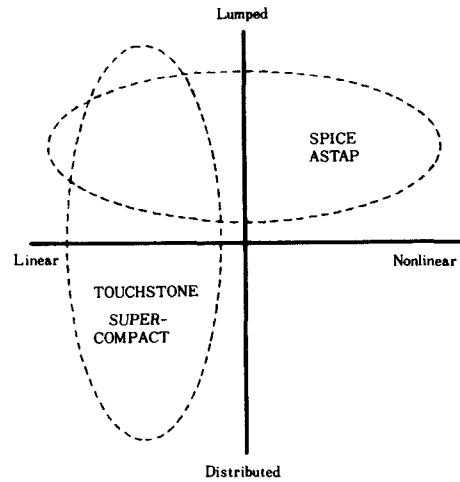


그림 4.

위의 그림을 보면 현재 가용한 상용 프로그램 TOUCHSTONE과 SUPERCOMPACT, 그리고 SPICE와 그의 전신인 ASTAP들을 기능면에서 일목 요연하게 보았다.¹²⁾ SUPERCOMPACT와 TOUCHSTONE은 linear-lumped와 linear-distributed domain에서 사용될 수 있지만 nonlinear domain에는 적합하지 못하고 SPICE와 ASTAP은 nonlinear-lumped domain에서는 사용이 가능하지만 분포정수회로에는 잘 적용되기 어렵다.

VI. 결 론

초창기의 초고주파 CAD는 지극히 이상적인 아주 단순한 회로와 소자들의 모델을 사용했었으나 점차로 기생효과나 불연속등을 MIC 설계 프로그램에 포함시키게 되었으며 자동화된 마스크 제작과정을 고려하여 도면내의 소자들의 기하학적인 파라메타들의 차원에서 설계를 최적화하고 있는 추세이다.

또한 이전의 개별적인 개념들을 단일 프로그램에서 통합하여 tolerance나 모델의 정밀성등을 개선시킬 수 있는 좀 더 실제적이고 복잡한 초고주파 회로설계 도구들이 개발되고 있다. 특히 harmonic balanced method를 이용한 범용설계 알고리즘이 두각을 나타내고 있으며 앞으로의 CAD 패키지는 linear와 nonlinear design사이에 존재하는 구별을 제거할 수 있는 것이 되리라 믿어진다.

參 考 文 獻

- [1] R.H. Jansen, "Computer-Aided Design of Hybrid and Monolithic MIC," IEEE Press, pp. 437-447, 1988.
- [2] Donald Estreich, "Nonlinear Modeling for MMIC's," IEEE MTT-S Digest, pp. 85-88, 1987.
- [3] Guillermo Gonzalez, *Microwave Transister Amplifiers Analysis and Design*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1984.
- [4] H.A. Haus, "Representation of Noise in Linear Two Ports," IRE Subcommittee 7.9 on Noise, Proceedings of the IEEE, January 1960.
- [5] T.T. Ha, *Solid State Microwave Amplifier Design*, Wiley-Interscience, New York, 1981.
- [6] L. Besser, "Microwave Circuit Design," Electronic Engineering, October 1980.
- [7] Jeffrey Frey, *Microwave Integrated Circuits*, Artech House Inc., pp. 357-389, 1975.
- [8] R.S. Carson, *High-Frequency Amplifiers*, Wiley-Interscience, New York, 1975.
- [9] Dilorenzo Khandelwal, "GaAs FET Principles and Technology," Artech House, Inc., 1982.
- [10] S-Parameter design. Hewlett-Packard application note 154, April 1972.
- [11] G.J. Wheeler, *Introduction to Microwave*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1963.
- [12] Boukamp, M.E.E. Thesis, University of Aachen, 1978.
- [13] George D. Vendelin, "Design of Amplifiers and Oscillators by the S-Parameter Method," A Wiley-interscience, Pub., pp. 93-130, 1982.
- [14] D.V. Morgan, M.J. Howes, "Microwave Solid State Device and Application," Peter Peregrinus Ltd., pp. 87-102, 1980.
- [15] R.H. Jansen, Koster, IEEE MTT-symp. Dig., Dallas, pp. 305-307, 1982.
- [16] W.J. Getsinger, "Measurment and Modeling of the Apparent Characteristic Impedance of Microstrip, *IEEE Trans.*, MTT-31, 1983. ㉔

筆 者 紹 介

羅 克 煥 (正會員)

1950年 10月 13日生

1969年~1973年 연세대학교 전자과 졸업

1975年~1977年 연세대학교 대학원 전자과 졸업

1978年~1981年 불란서 Toulouse의 ENSEEIHT 대학
전자과에서 공학박사 취득

1977年~1978年 아주대학교 전임조교

1987年 미국 COMSAT 연구소 방문교수 (1년)

1981年~현재 광운대학교 부교수