

## 공중폭발 탄용 후막 발진회로의 수신감도 안정화 모델

任永徹\*, 金冠佑<sup>†</sup>, 崔珍鳳\*\*, 鄭榮國\*\*\*

## The Stabilization Model of Receive Sensitivity of Thick Film Oscillation Circuit for Air Explosion Shell

Young-Cheol Lim, Kwan-Woo Kim, Jin-Bong Choi, and Young-Gook Jung

## 요약

본 논문은 군용 공중폭발탄에 사용하는 발진기의 에러를 최소화 하고, 그 효율을 극대화하기 위하여 시뮬레이션과 매우 유사한 형태의 통계적 모델링 방법을 제안한다. 제안된 방법은 일정하고 안정된 출력을 내는 실제 모델에서 실험 계획에 의하여 얻은 데이터로부터 통계적인 해석을 통하여 새로운 형태의 방정식을 구하였다. 그리고 그것을 바탕으로 각각의 전자 부품들을 출력과 일치되도록 모델링 한 후, 출력 예측이 가능한 시뮬레이션을 수행하고, 실제 모델의 출력 데이터와 비교하여 그 유용성, 정확도 및 정밀도를 입증하였다.

## ABSTRACT

This paper proposes the stabilization modelling method of receive sensitivity of thick film oscillation circuit for air explosion shell. The proposed method minimizes the errors of the thick film oscillator which uses air explosion shell for military and it is very similar to the simulation for maximizing the efficiency. Firstly, the proposed method gets the equation of new form through statistical analysis from the data which shows always fixed and stabilized output from the real model. Secondly, the simulation is designed which is possible to predict the output, after optimization that is a model to match the each electronic component output by the equation. In a conclusion, the usefulness, the accuracy and the precision are proved as compared with the output data of real model.

**Key Words** : The Stabilization Model, Receive Sensitivity, Thick Film Oscillation Circuit, Air Explosion Shell

## 1. 서론

하나의 독립된 소자로서의 고주파(Radio Frequency) 부품은 이미 보편화 되어있고, 일상생활에 깊이 파고들어 우리의 일부분이 된지 오래되었다. 그러나 특수한

용도로 활용되고 있는 고주파(RF)복합 부품의 경우 그 사용처, 그리고 기술, 상업적인 요인 등에 의하여 아직 까지도 불완전한 형태로 사용하고 있는 제품들이 존재하는데, 본 논문에서 제안하고자 하는 제품이 그러한 경우에 해당한다고 할 수 있겠다. 군 이라는 특수한 환경에서 사용 중인 850MHz 대역의 고주파 발진기에 관한 것으로 고주파 신호를 송신하고, 또 안테나를 통해 수신하여 탄이 낙하 할 때의 탄착지점을 도플러 효과를 이용하여 감지한 후, 일정 고도에서 기폭 하도록 신호를 내보내도록 설계되어 있는 RF Oscillator로서 특히, 가능한 한 좁은 범위의 폭발고도가 매우 중요한 요소

<sup>†</sup>교신저자 : 학생회원, 지에프텍(주) 기술연구소 책임연구원

E-mail : kwkim@gftek.com

\*정회원, 전남대 전기공학과 교수

\*\*학생회원, 지에프텍(주) 기술연구소 책임연구원

\*\*\*정회원, 대불대 융합기술학부 부교수

접수일자 : 2009. 8. 18

1차 심사 : 2009. 10. 3

심사완료 : 2009. 11. 16

로 작용하는 회로인데, 이를 위해서는 항상 일정한 고도에서 폭발하도록 하는 신호처리 회로와 신호의 발생 및 센싱 역할을 하는 발진기 회로가 필요하다, 이 중 발진기 회로의 경우, 동일한 소자라도 제조 로트에 따른 부품 편차와 주변 환경 등의 영향을 매우 많이 받을 수밖에 없으므로 이로 인한 폭발고도의 오차범위를 제어하는 것이 거의 불가능해지는 문제가 발생한다.

이를 해결하기 위한 방법은 각 소자들의 특성편차를 감안하여 맞춤형 최적회로를 구현하는 것인데, 반도체와 같은 능동소자의 경우 안정화된 Fab.에서 제조된 신뢰 할 수 있는 소자이지만, 고주파 회로에서는 비록 미세한 차이라 할지라도 출력 변동에 큰 영향을 끼치게 된다.

따라서 가장 좋은 해결 방법 중의 하나로, 통계적인 실험 계획법에 의하여 얻은 데이터를 통하여 정확한 해석을 하고, 궁극적으로 각 소자들의 특성편차와 최종 출력 값에 맞는 회로를 구성하여 최적화 하고 실제 제품제작과 평가를 통하여 최적회로를 구현하는 것이 가능해지도록 하는 것이다. 본 논문에서는 이를 위하여 통계적인 해석기법을 사용하였으며, 각 소자들 간의 최적 조합이 가능하도록 하는 모델링 방법에 의하여 고안된 비교적 간단한 시뮬레이션을 제안하였고, 실제 환경에서 운용상의 에러 확률을 최소화 하고, 기존의 기술에 대하여 효율을 극대화하기 위한 수단으로 활용하고자 한다. 이를 검증하기 위하여 사용한 제품으로는 실제 사용중인 회로로서 알루미늄나 세라믹 기판 상에 후막 공법으로 제작되어 있는 제품이며, 각 동작 특성을 비교, 분석하여, 출력에 가장 큰 영향을 미치는 핵심소자의 선정, 그 소자의 값, 그리고 각 소자들의 최적 조합을 통한 모델링과 그것의 신뢰도를 측정하기 위한 수단으로 신뢰도 95% 이상의 통계적 분석 Tool인 MiniTab을 활용하였다.<sup>[4],[5]</sup>

## 2. 본 론

### 2.1 일반적인 발진기의 구조 및 동작원리

일반적인 발진기의 동작원리는 아래 그림과 같다. 그림 1에서  $A(j\omega)$ 는 증폭기의 전압이득,  $\beta(j\omega)$ 는 전압 귀환회로의 전달함수를 나타낸다. 그림 1로부터 각 신호는 다음과 같이 나타낸다.<sup>[1],[10-12]</sup>

$$V_o = A(j\omega) V_a(j\omega) \quad \text{단, } V_a = V_f(j\omega) + V_{in}(j\omega) \quad (1)$$

$$V_f = \beta(j\omega) V_o(j\omega) \quad (2)$$

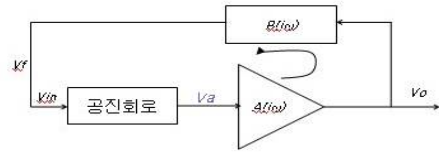


그림 1 궤환 회로를 가진 발진기 구조  
Fig. 1 Structure of oscillator with feedback circuit

### 2.2 일반적인 발진기 모델

그림 2(a)에는 일반적인 페루프 시스템에 대한 모델을 나타내고 있으며, 그림 2(b)에는 이를 4단자 회로로 나타내었다. 이 회로가 발진단자 회로로 학회로조건은 증폭단 전달함수  $H_A(\omega)$ 와 궤환단 전달함수  $H_F(\omega)$ 로 페루프 전달함수를 정함으로써 구할 수 있다.<sup>[1]</sup>

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = H_{CL}(\omega) = \frac{H_A(\omega)}{1 - H_F(\omega)H_A(\omega)} \quad (3)$$

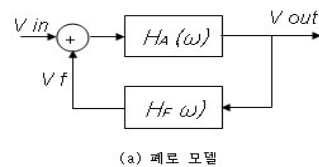
발진기에는 입력이 없으므로  $V_{in}=0$ 이며, 0이 아닌 출력전압  $V_{out}$ 을 얻기 위해서는 (3)의 분모가 0이 되어야 한다. 이 필요조건을 Barkhausen Criterion이라하며, 이는 루프이득 방정식으로도 알려져 있다.<sup>[1]</sup>

$$H_F(\omega)H_A(\omega) = 1 \quad (4)$$

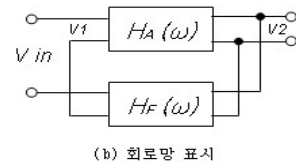
궤환 전달함수  $H_F(\omega)$ 가 복소량으로 주어지고  $[H_F(\omega) = H_{Fr}(\omega) + jH_{Fi}(\omega)]$  증폭단 전달함수가 실수이득,  $H_A(\omega) = H_{A0}$ 를 가지는 경우라면 (4)는 다음과 같이 바뀌 쓸 수 있다.<sup>[1]</sup>

$$H_{A0} = \frac{1}{H_{Fr}(\omega)} \quad (5)$$

$$H_{Fi}(\omega) = 0 \quad (6)$$



(a) 페루프 모델



(b) 회로망 표시

그림 2 발진기 모델  
Fig. 2 Oscillator model

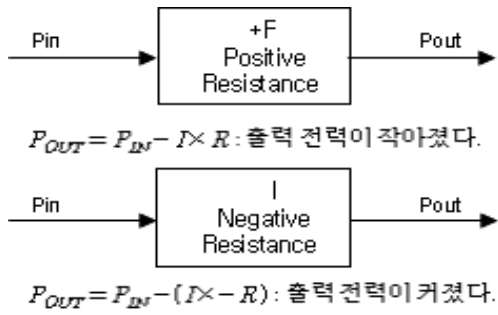


그림 3 부성저항의 개념을 이용한 발진조건  
Fig. 3 Oscillate condition with concept of negative resistance

(3)과 (4)의 조건은 정상상태 조건에만 적용된다. 여기서 초기조건은  $H_{A0}H_{Fv}(\omega) > 1$  이다. 이는 출력전압이 증가하기 위해서는 루프이득이 1보다 커야함을 의미한다. 그러나 최종적으로 진폭이 안정화되기 위해서는 이 출력전압은 정상상태에 도달해야 하며 이와 같이 출력전압의 증가에 대해 루프이득이 저하하는 효과를 부성저항 특성이라 한다.<sup>[2]</sup>

(1) 초기 발진조건

$$| -R | > R_{LOAD} \tag{7}$$

입력단의 부성저항 크기가 출력단의 부하저항보다 커야한다. 이 조건을 만족하면 발진을 시작한다.

(2) 정상상태 발진조건

$$| -R | = R_{LOAD} \tag{8}$$

발진이 시작되면 부성저항의 크기(절대치)가 줄어든다. 이때 그 값이 출력 부하저항 값과 같아지면 발진의 증가가 멈추고 크기가 고정된다. 그림 4는 시간의 경과에 따라 발진기가 정상상태로 들어가는 과정을 보여준다.<sup>[2],[13]</sup>

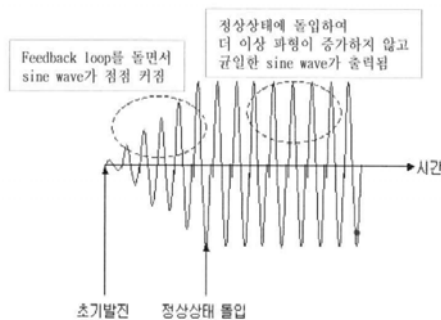


그림 4 발진기의 시작과 정상상태 돌입  
Fig. 4 Start and normal condition of oscillator

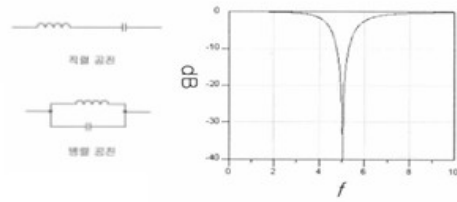


그림 5 직병렬 공진회로와 주파수 특성  
Fig. 5 Serial and parallel resonant circuit and its frequency characteristic

### 2.3 공진회로

발진기의 주파수 선택은 공진회로에 의해서 결정된다. LC 직렬공진은 대역통과(Bandpass)형태의 공진이 발생하고, LC 병렬공진은 대역저지(Bandstop)형태의 공진이 발생한다.<sup>[3]</sup>

직렬 공진회로를 고찰해 봄으로써 쉽게 이해할 수 있다. 우선 입력으로 전류제어 전압 원을 생각한다. BJT나 FET와 같은 능동소자의 출력을 이 전압 원으로 나타낼 수 있다. 이 회로에 대한 방정식을 전류 항으로 나타내면 다음과 같다.<sup>[2],[6-9]</sup>

$$L \frac{d^2 i(t)}{dt^2} + R \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} i(t) = - \frac{dv(i)}{dt} \tag{9}$$

여기서 우변을 0으로 놓으면(정상상태에 도달하여 전압진폭이 안정화된 경우) 다음과 같은 표준 해가 구해진다.

$$i(t) = e^{\alpha t} (I_1 e^{j\omega_Q t} + I_2 e^{-j\omega_Q t}) \tag{10}$$

여기서  $\alpha = -\frac{R}{2L}$  이고,  $\omega_Q = \sqrt{1/(LC) - (R/2L)^2}$  이다.

일반적으로  $\alpha$ 는 음수 값을 가지기 때문에 시간이 경과함에 따라 공진회로의 고조파 응답(Harmonic Response)은 0으로 감쇄된다. 이렇게 하여 그 극한에서는 R이 0으로 됨에 따라 비제동 정현응답(Undamped Sinusoidal Response)이 얻어지게 된다. 따라서 공진기에서 능동소자를 사용하는 목적은 회로의 저항을 보상하는 전원응답(Source Response)을 발생시키는 것이다. 이는 부성저항을 통해서만 달성될 수 있다.

그러나, 단순히 생각하면 L, C 소자만으로 간단히 공진을 유발 할 수는 있지만, 고주파 발진에 사용 하려

면 Q값이나 기타 문제로 사용이 제한적이다. 그래서 저주파에서는 쉽게 사용되지만 고주파 영역에서는 단순히 L, C 소자를 이용하기 보다는 Microstrip, 가변커패시터의 조합으로 만들어지는 경우가 많다. 여기서 Microstrip 공진기는 Inductor처럼 LC공진기와 유사한 역할을 수행하게 된다.<sup>[3]</sup>

### 2.4 후막(Thick film)공법을 이용한 발진기 기판 및 패턴

그림 6은 본 논문에 제안된 안테나와 공진용 L, C 그리고 저항을 기판에 내장하여 구성된 발진기 회로를 나타내고 있으며, 그림 7은 후막공법으로 제작한 회로 기판과 기판에 형성된 Microstrip Pattern을 나타내고 있다.<sup>[10,11]</sup> 여기에서 L1은 발진주파수의 송신과 수신 기능을 수행하는 안테나이고, C13~C17은 DC 차단용 Coupling Capacitor 이다.

특히, 이 안테나와 구성 요소들은 고주파 신호의 송수신을 수행하며, 방사패턴에 따라 포탄의 허용 입사각을 결정한다.

회로의 주요 구성부인 공진부, 발진부, 혼합부와 바이어스부의 역할은 각각, 공진부에서는 발진주파수를 결정하고, 바이어스 회로는 발진부로 안정적인 전원 공급과 함께 발진주파수와 발진출력을 안정화 시키는 역할을 수행한다. 또한 혼합회로는 베이스와 에미터가 등전위로 연결되어 컷-오프 영역에 있으나, 등가화 한 인덕턴스 L7이 에미터 단자에 연결되었기 때문에 발진전력이 L7로 유입될 경우, 혼합부 트랜지스터는 다이오드와 같은 스위치로 동작하게 된다.

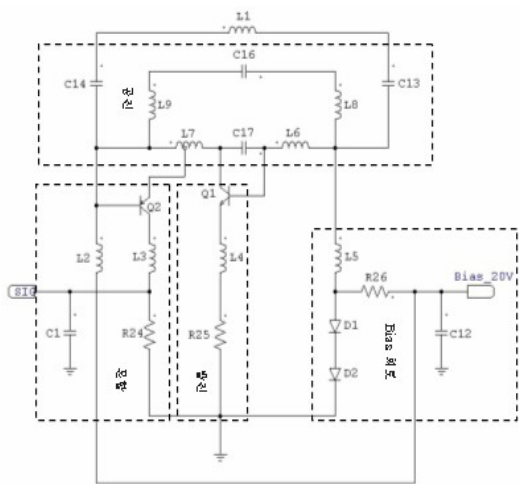


그림 6 발진기 회로  
Fig. 6 Oscillate circuit

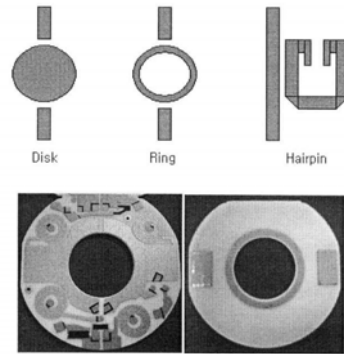


그림 7 마이크로 스트립 패턴과 후막형 발진기 기판  
Fig. 7 Microstrip line and substrate of thick film oscillator

## 3. 실험 및 고찰

### 3.1 사용부품

- (1)Substrate : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 96% 알루미나 세라믹
- (2)Conductor resistor, inductor : Au 99.99%, RuO<sub>2</sub>
- (3)내장형 소자 : C1~C4, L2~L7, R24~R26
- (4)능동소자  
Q1:NPN Transistor, MMST918(ROHM)  
Q2:PNP Transistor, MMBT3906(Onsemi)  
D1,D2 : Dual series switching diode
- (5)수동소자(Chip type)  
C11,C12 : 2012 MLCC(56pF)
- (6)기타 : 안테나, Choke bridge(Metal Silver)

### 3.2 측정시스템 구성

- (1)전원전압 : 20Vdc
- (2)측정기 구성(조건)
  - .Ferrite Reflector Load Chamber
  - .DC Power Supply(HP6627A)
  - .Digital Multi-meter(HP34401A)
  - .Frequency Counter(HP5385A)
  - .Spectrum Analyzer(HP8594E)

### 3.3 측정 결과

그림 8에서 보이는 바와 같이 발진기의 주파수 특성은 안정적이거나, ac전압레벨은 매우 낮게 출력됨을 알 수 있다. 이는 발진기가 회로 전체의 임피던스와 Q1,Q2의 전류 증폭률( $\beta$ ), 그리고 트랜지스터의 전류제

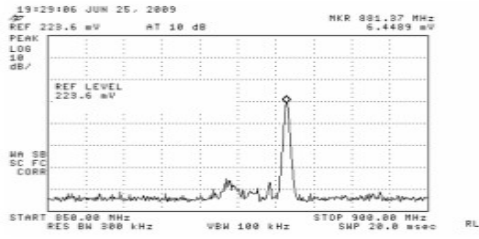


그림 8 출력파형의 주파수 대 전압특성  
Fig. 8 Frequency vs voltage of output waveform

한 소자인 R24와 R25, R26의 영향을 대단히 많이 받게 됨으로 인해 회로의 구성 소자들을 기본 값 그대로 사용하게 되면, 출력전압( $V_o$ )레벨과 전류의 변동 폭이 커짐을 알 수 있다.

표1은 초기 시제품의 출력 측정 데이터이며, 능동소자인 Q1,Q2는 구매한 표준부품을 그대로 사용하였으며, R24와 R25는 각각 초기 고정저항 값인 900ohm, 90ohm을 동일하게 적용하였을 때의 주파수를 제외한 전압, 전류의 출력 산포가 상대적으로 큰 것을 알 수 있다.<sup>[4],[5]</sup>

즉, 안정된 품질(수율)을 확보하기 위해서는 각 특성별 규격 내에 4개 이상(통계적으로 6개 이상을 6시그마 수준 이라고 함)의 표준편차가 들어야 하는데, 주파수를 제외한 나머지 특성은 2~3개로 대량생산 시에 그에 따른 불량확률이 매우 높을 것으로 예상된다. 표 2는 회로에 사용된 능동소자 Q1,Q2의 기본 특성을 나타내고 있다.

표 1 출력 분포  
Table 1 Output distribution

No.	Output			
	Frequency(MHz)	Detect Volt(Vdc)	Sense Volt(Vrms)	Current(mA dc)
1	882.0	8.7	16.2	27.5
2	878.0	9.0	16.1	31.1
3	881.0	10.6	12.4	29.2
4	874.0	10.2	15.7	30.5
5	877.0	9.8	15.9	30.1
6	878.0	9.9	15.7	31.0
7	885.0	9.4	15.9	31.2
8	873.0	10.0	18.3	33.2
9	879.0	11.2	14.2	28.3
10	878.0	10.9	16.3	29.8
11	874.0	10.3	18.0	32.5
12	877.0	10.3	16.3	32.1
13	877.0	10.6	16.0	31.6
평균	877.9	10.1	15.9	30.6
표준편차	3.4	0.7	1.5	1.6
규격	875±25	9.0-11.0	10.5-15.5	26.0-31.0
규격내에 표준편차가 들어갈 최대 개수	14.0	2	3	3

표 2 트랜지스터의 전기적 특성

Table 2 Electrical characteristics of transistor

MMST918						
Electrical characteristics (T <sub>A</sub> = 25°C)						
Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit	Conditions
Collector-base breakdown voltage	V <sub>CB0</sub>	20	-	-	V	I <sub>C</sub> =10µA
Collector-emitter breakdown voltage	V <sub>CE0</sub>	18	-	-	V	I <sub>C</sub> =10µA
Emitter-base breakdown voltage	V <sub>EB0</sub>	3.0	-	-	V	I <sub>B</sub> =10µA
Collector cutoff current	I <sub>CO</sub>	-	-	0.01	µA	V <sub>CE</sub> =10V
DC current transfer ratio	h <sub>FE</sub>	20	-	-	-	I <sub>C</sub> =10mA, V <sub>CE</sub> =10V
Collector-emitter saturation voltage	V <sub>CE(sat)</sub>	-	-	0.4	V	I <sub>C</sub> =10mA
Base-emitter saturation voltage	V <sub>BE(sat)</sub>	-	-	1.0	V	I <sub>C</sub> =10mA
Transition frequency	f <sub>T</sub>	800	-	-	MHz	I <sub>C</sub> =10mA, V <sub>CE</sub> =10V, f <sub>MAX</sub> =1MHz
Output capacitance	C <sub>ob</sub>	-	-	1.7	pf	V <sub>CE</sub> =10V, f <sub>MAX</sub> =1MHz
Emitter input capacitance	C <sub>ib</sub>	-	-	3.0	pf	V <sub>CE</sub> =10V, f <sub>MAX</sub> =1MHz
Noise figure	N <sub>F</sub>	-	-	5.0	dB	I <sub>C</sub> =10mA, V <sub>CE</sub> =10V, f <sub>MAX</sub> =1MHz
Power gain	G <sub>p</sub>	15	-	-	dB	V <sub>CE</sub> =10V, I <sub>C</sub> =10mA, P <sub>CE</sub> (dBm)=0
Output power	P <sub>out</sub>	10	-	-	mW	V <sub>CE</sub> =10V, I <sub>C</sub> =10mA, P <sub>CE</sub> (dBm)=0
Collector efficiency	η	25	-	-	%	V <sub>CE</sub> =10V, I <sub>C</sub> =10mA, P <sub>CE</sub> (dBm)=0

MMBT3906LT1				
ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T <sub>A</sub> = 25°C unless otherwise noted) (Continued)				
Characteristic	Symbol	Min	Max	Unit
<b>ON CHARACTERISTICS<sup>(1)</sup></b>				
DC Current Gain	h <sub>FE</sub>	60	-	-
(I <sub>C</sub> = 0.1 mA, V <sub>CE</sub> = -1.0 Vdc)		80	-	-
(I <sub>C</sub> = 1.0 mA, V <sub>CE</sub> = -1.0 Vdc)		100	300	-
(I <sub>C</sub> = 10 mA, V <sub>CE</sub> = -1.0 Vdc)		60	-	-
(I <sub>C</sub> = 100 mA, V <sub>CE</sub> = -1.0 Vdc)		30	-	-
Collector-Emitter Saturation Voltage	V <sub>CE(sat)</sub>	-	-0.25	Vdc
(I <sub>C</sub> = 10 mA, I <sub>B</sub> = -1.0 mA)		-	-0.4	
(I <sub>C</sub> = 50 mA, I <sub>B</sub> = -5.0 mA)		-	-	
Base-Emitter Saturation Voltage	V <sub>BE(sat)</sub>	-0.65	-0.85	Vdc
(I <sub>C</sub> = 10 mA, I <sub>B</sub> = -1.0 mA)		-	-0.95	
(I <sub>C</sub> = 50 mA, I <sub>B</sub> = -5.0 mA)		-	-	

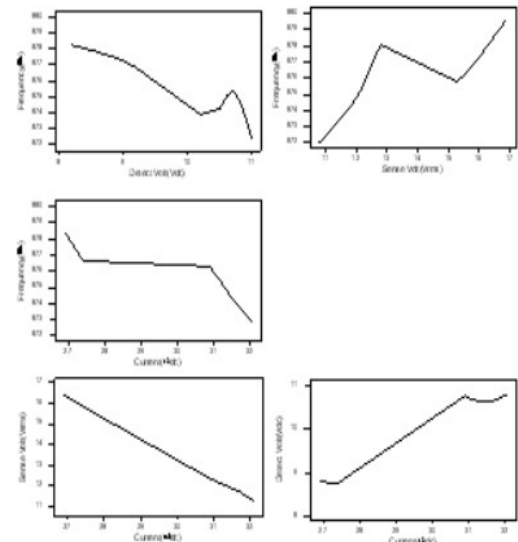


그림 9 출력특성별 상관관계  
Fig. 9 Correlation between output characteristic

그림 9는 각 출력특성 간 상관관계를 표준편차 방식을 이용하여 분석한 그래프이다. 여기서 발진주파수-전류를 제외한 나머지 특성들은 모두 상관관계가 큰(특성 값에 따른 각 출력 분포)것을 알 수 있다. 그래프의 기울기는 독립 항과 종속항의 상관관계의 크기를 나타낸다.<sup>[4]</sup>

### 3.4 핵심소자 선정과 소자의 최적값을 구하기 위한 실험계획 설계

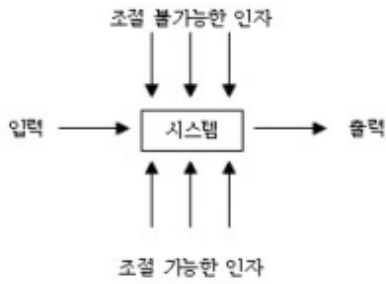


그림 10 실험모형  
Fig. 10 Model with an experiment

최소 횟수의 실험을 통해 최대의 정보를 신속히 얻기 위한 방법으로 통계이론을 통하여 조절이 가능하고, 출력에 중요한 영향을 주는 인자와 출력간의 관계를 모델링 하여 1)출력에 가장 중요한 인자가 무엇인지를 알 수 있고, 2)선별된 인자들과 출력의 기능적 관계를 도출 할 수 있다. 3)그리고 그 인자들의 수준별 조합과 그를 통한 최적 해의 도출 등이 가능하다.<sup>[4],[5]</sup>

그림 10, 그림 11과 같이 실험을 통하여 얻은 데이터를 분석하고, 그 결과를 바탕으로 최적 조합을 찾아내게 된다. 표3은 실험배치와 그에 따른 출력을 보여주고 있다.

표 3 실험계획과 출력데이터  
Table 3 Experiment plan and output data

StdOrder	RunOrder	Blocks	Q4(MMBT3906_hFE)	R24(u)	R25(u)	Freq.(MHz)	Det.V(dc)	Sen.V(ms)	u(dc)
1	1	1	130.0	800.0	80.0	875.1	8.11	13.82	27.39
14	2	1	155.0	1,000.0	133.6	871.9	7.84	15.41	21.5
16	3	1	155.0	1,000.0	100.0	875.2	9.94	16.9	26.78
7	4	1	130.0	1,200.0	120.0	879.3	7.52	16.84	23.41
5	5	1	130.0	800.0	120.0	875.3	6.9	12.55	23.58
9	6	1	113.0	1,000.0	100.0	865.3	7.12	11.04	21.74
10	7	1	197.0	1,000.0	100.0	870.2	10.55	16.69	29.52
4	8	1	180.0	1,200.0	80.0	879.3	14.2	18.03	32.5
6	9	1	180.0	800.0	120.0	868.1	8.15	14.54	25.88
12	10	1	155.0	1,336.4	100.0	881.2	11.85	20.21	26.1
17	11	1	155.0	1,000.0	100.0	872.3	9.41	15.11	27.4
19	12	1	155.0	1,000.0	100.0	873.1	9.06	16.23	26.35
15	13	1	155.0	1,000.0	100.0	870.6	9.78	16.8	26.52
20	14	1	155.0	1,000.0	100.0	872.5	9.11	16.14	27.25
11	15	1	155.0	863.6	100.0	865.5	8	14.5	28.55
8	16	1	180.0	1,200.0	120.0	878.7	8.6	18.44	27.33
3	17	1	130.0	1,200.0	80.0	872.4	7.06	17.93	31.5
18	18	1	155.0	1,000.0	100.0	877.8	8.9	15.64	26.45
13	19	1	155.0	1,000.0	66.4	877.4	10.88	14.68	33.96
2	20	1	180.0	800.0	80.0	875.7	8.58	12.07	32.1

- Design of the Experiment
- Design Plan (3 factor 2 level response surface design)
- . Factor : Q4, R24, R25
- . Number of times : 20
- Factorial Design Result

3.5 그래프를 통한 모델링의 적합성 검증

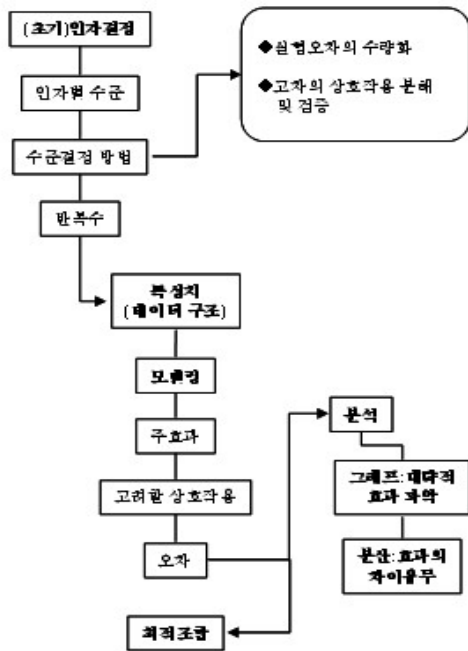
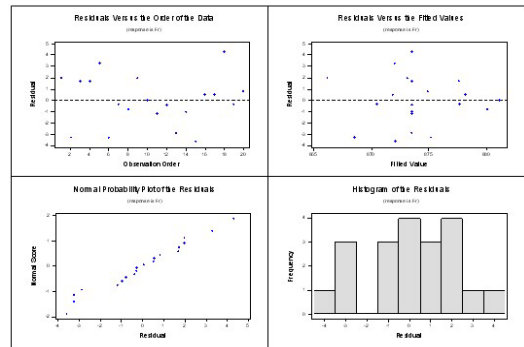
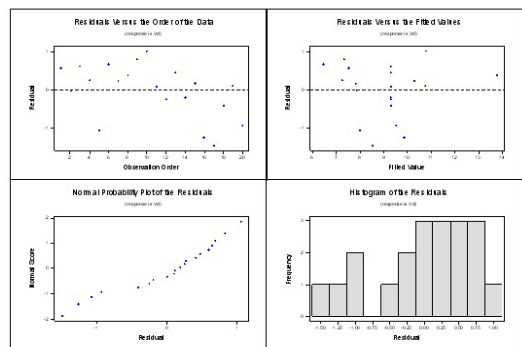


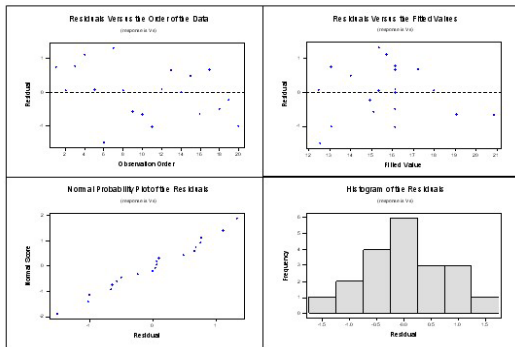
그림 11 실험 순서도  
Fig. 11 Flow chart of experiment



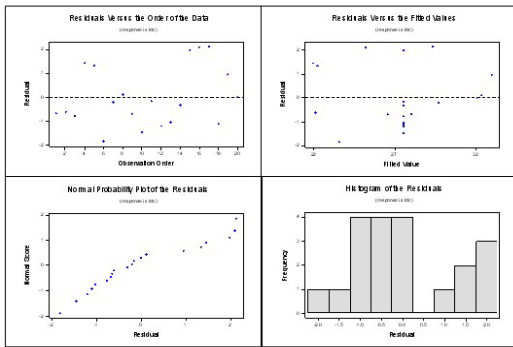
◆ Residuals graph for oscillate frequency



◆ Residuals graph for detection voltage



◆ Residuals graph for sensing voltage



◆ Residuals graph for loop current

그림 12 모델링 식의 적합성 검증  
Fig. 12 Verification graph of modeling equation compatibility

그림 12는 실험의 적합성을 검증하기 위하여 실험계획에 의하여 유도된 식과 실험데이터와의 차이인 잔차를 분석한 그래프이다. 만일, 이 잔차가 정규분포 하고 있다면, 이 모델링 방정식의 신뢰도는 높다고 할 수 있는데, 그림에서 1사분면과 2사분면은 잔차 데이터가 특정한 경향을 보이지 않는 것이 정규분포에 가까운 것이며, 3사분면은 정(+)방향으로 직선에 가까운 경향을 띄고 있으므로 정규분포 한다고 볼 수 있다.<sup>[4],[5]</sup>

그리고, 그림 13은 각 모델링 식이 정규분포를 하고 있는지를 판단하기 위한 정규성 검증그래프이다. 여기서 정규분포 여부를 판단하는 기준은 P-value로 P-value가 0.05 즉, 5% 이상이면, 정규분포라고 전제 할 수 있다.

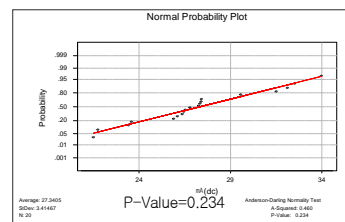
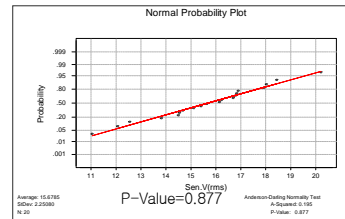
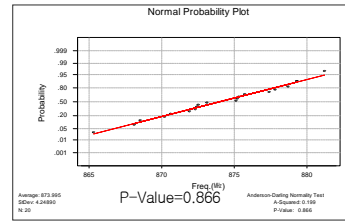
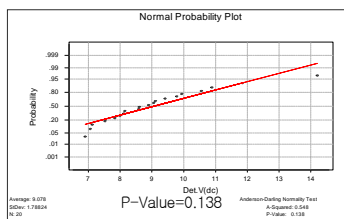
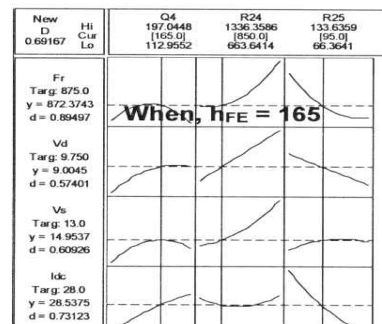
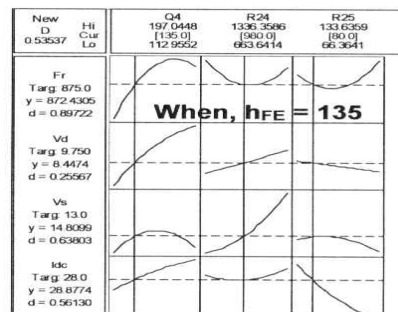


그림 13 정규분포 검증 그래프  
Fig. 13 Normal probability plot

### 3.6 최적화

그림 14는 각 출력특성이 요구되는 규격을 만족하도록 각 인자(Q4, R24, R25)들의 최적 해를 구하는 최적화 과정을 보여주고 있다.





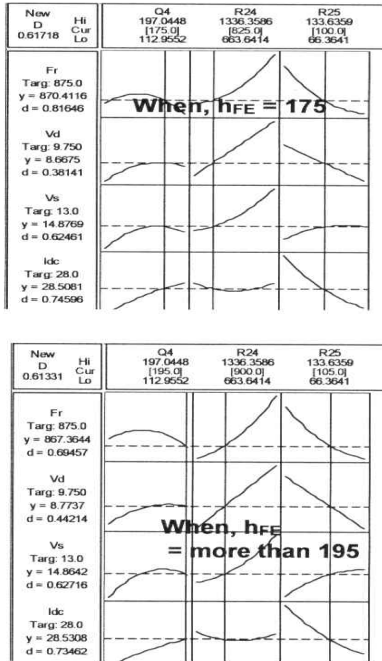


그림 14 설계 최적화  
Fig. 14 Design optimization

각 그림의 상단 행에 표기된 문자(Q4, R24, R25)는 핵심소자인 인자들과 그 인자들의 최소, 최대 범위(혹 색)와 최적 값(적색)이며, 세로 열로 형성된 적색의 실 선을 좌, 우로 움직이면 값의 변화가 나타나도록 되어 있다. 또한 좌측 열은 각 출력항목과 규격을 보여주고 있는데 각각의 그림은 트랜지스터(Q4)의 h<sub>FE</sub>에 따라 인자들의 시정수가 다르며, 복수 개의 출력특성을 동시에 만족하기 위해서는 Q4의 특성에 따라서 R24와 R25의 값이 달라져야 한다는 것을 보여주고 있다.<sup>[5]</sup>

3.7 모델링 방정식

<p>Frequency(MHz)</p> $= 883.8611908 + 0.7773807 \cdot Q4 - 0.1348448 \cdot R24 - 0.3931813 \cdot R25 - 0.0022391 \cdot Q4 \cdot Q4 + 0.0000278 \cdot R24 \cdot R24 + 0.0026002 \cdot R25 \cdot R25 + 0.0003225 \cdot Q4 \cdot R24 - 0.003825 \cdot Q4 \cdot R25 + 0.0004281 \cdot R24 \cdot R25$	<p>Detection Voltage(Vdc)</p> $= -15.8973616 + 0.1804069 \cdot Q4 - 0.0098145 \cdot R24 + 0.270434 \cdot R25 - 0.0006319 \cdot Q4 \cdot Q4 + 0.0001625 \cdot Q4 \cdot R24 - 0.00132 \cdot Q4 \cdot R25 - 0.0001094 \cdot R24 \cdot R25$
<p>Sensing Voltage(Vrms)</p> $= -9.067787 + 0.2852613 \cdot Q4 - 0.0129105 \cdot R24 - 0.0194131 \cdot R25 - 0.0012347 \cdot Q4 \cdot Q4 + 0.0000116 \cdot R24 \cdot R24 - 0.0008862 \cdot R25 \cdot R25 + 0.00131 \cdot Q4 \cdot R25$	<p>Current(mA)</p> $= 39.6393366 + 0.1845348 \cdot Q4 - 0.0174965 \cdot R24 - 0.3201155 \cdot R25 - 0.0003589 \cdot Q4 \cdot Q4 - 0.0000138 \cdot R24 \cdot R24 + 0.0012953 \cdot R25 \cdot R25 - 0.0001009 \cdot R24 \cdot R25$

표 4 각 인자들의 최적 시정수와 조합 구성표  
Table 4 Mixture construction for each factor

최적 배(시정수)	Q4 h <sub>FE</sub>	R24 Ω	R25 Ω	표준 편차 σ	허용공차 (Q)
1	181 ~ 140	800	80	±1	±8
2	141 ~ 150	800	85	±1	±8
8	151 ~ 180	880	90	±1	±8
4	181 ~ 170	880	85	±1	±8
5	171 ~ 180	825	100	±1	±8
6	181 ~ 180	850	105	±1	±8
7	181 ~ 200	900	105	±1	±8

3.8 실험결과

최적화 결과를 바탕으로 구하여진 각 소자(인자)들의 시정수를 항상 일정한 출력이 나오도록 조합하는 것이 가능해진다.

3.9 결과요약

먼저, 고유의 값을 고정시켜야 할 소자로 기관 상에 내장된 인덕터와 커패시터를 선정하고, 발진부의 PNP 트랜지스터 Q1의 h<sub>FE</sub>를 Curve Tracer로 측정 한 후, h<sub>FE</sub>값을 10단위로 분류한다. 이를 통계적인 실험 계획법에 의하여 실험하고, 그 결과분석을 토대로 Q1의 h<sub>FE</sub>와 내장형 인쇄저항의 최적 값을 산출하여 원하는 값으로 조정하고 제작하여 각각의 출력특성을 분석한다. 그 결과 규격 내에서 안정적인 동작을 하는 것이 검증되었고, 나아가서 각 소자들의 최적 값을 미리 예측할 수 있는 모델링 방정식을 도출하였으며 엑셀 스프레드시트를 이용하여 시뮬레이션 프로그램 작성이 가능하다.<sup>[4],[5]</sup>

그림 15에 커브-트레이서를 이용한 트랜지스터의 h<sub>FE</sub> 측정상태를 나타내었으며, 그림 16은 실험 결과에 의한 모델링 식을 수식화 하여 엑셀 프로그램과 접목한 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

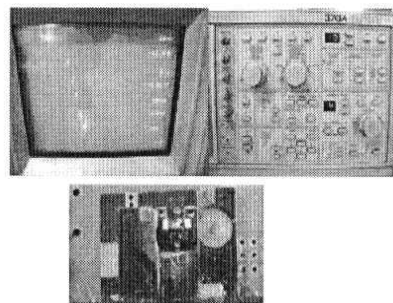


그림 15 트랜지스터의 h<sub>FE</sub> 측정  
Fig. 15 Measurement of transistor h<sub>FE</sub>



표 5 모델링 식을 이용한 모의실험 데이터  
Table 5 Simulation result by modeling equation

Q4	R24	R25	예상출력			
			발진주파수 (875±25)kHz	검파전압 (9.0-11.0)Vdc	발진감도 (10.5-15.5)Vrms	소비전류 (26.0-31.0)mA
153.0	885.5	80.1	865.0	10.3	12.2	30.3
154.9	881.2	81.1	864.9	10.4	12.2	30.3
148.8	880.1	80.5	864.6	10.0	12.1	29.9
147.6	876.9	80.8	864.4	9.9	12.0	29.8
152.5	883.4	80.6	864.8	10.3	12.1	30.2
150.3	871.4	80.0	864.8	10.1	12.0	30.2
149.4	875.4	79.9	864.7	10.0	12.0	30.1
152.7	878.5	79.9	865.2	10.3	12.0	30.5
143.2	873.3	81.0	864.0	9.6	11.8	29.4
143.2	883.2	81.8	863.8	9.7	11.9	29.2
149.0	879.4	80.5	864.6	10.0	12.0	29.9
147.8	887.3	80.6	864.4	10.0	12.1	29.8
151.8	869.0	78.6	865.2	10.2	12.0	30.5
150.3	890.3	78.1	865.1	10.2	12.1	30.5
150.6	877.1	80.5	864.7	10.1	12.1	30.1
157.5	881.7	79.6	865.3	10.5	12.1	30.7
155.3	878.6	78.8	865.4	10.4	12.1	30.8
152.7	877.9	79.0	865.2	10.3	12.0	30.5
149.1	881.4	79.1	864.8	10.1	12.0	30.2
152.2	879.8	80.3	864.9	10.2	12.1	30.2
148.9	879.2	80.1	864.7	10.0	12.0	30.0
157.0	878.5	79.5	865.3	10.5	12.1	30.7
153.5	882.9	78.5	865.3	10.4	12.1	30.7
144.8	879.7	79.1	864.4	9.8	11.9	29.9
153.1	884.1	79.3	865.1	10.3	12.1	30.5
153.5	882.1	80.5	864.9	10.3	12.1	30.3
154.1	871.6	81.4	864.8	10.2	12.1	30.2
138.7	886.1	79.6	863.5	9.4	11.7	29.3
143.3	885.6	79.8	864.1	9.7	11.9	29.6
151.0	876.7	79.7	864.9	10.1	12.0	30.3

표 4의 구성 표에 근거하여 실제 제품을 제작한 후, 측정 결과를 보면 초기 시제품에 비하여 AC전압레벨의 크기가 증가하였음을 알 수 있다. 표 5의 가상실험 데이터 개수는 한 개~약 십만 개의 수집이 가능하며, 제품을 생산하기 전 핵심소자인 트랜지스터의  $h_{FE}$  분포에 따라 얼마든지 시뮬레이션 할 수 있다. 그림 16은 개선된 출력파형을 보여주고 있다.  $h_{FE}$  범위가 150~155 정도인 트랜지스터(Q4)와 R24 860ohm, R25 80ohm을 조합한 결과, AC레벨이 상승하였음을 보여준다. 만일, Q4의  $h_{FE}$  범위가 달라지면 R24와 R25의 시정수도 달라져야 함을 의미한다.

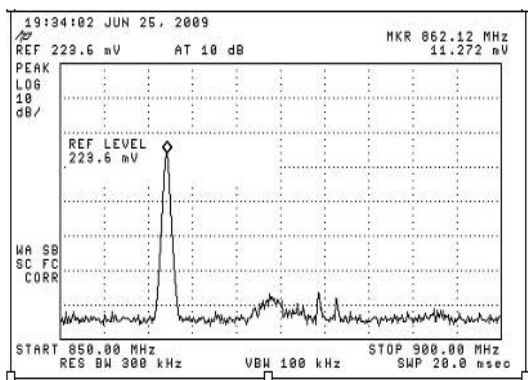


그림 16 개선된 출력파형과 주파수 대 전압특성  
Fig. 16 Improved waveform and F-V characteristic

#### 4. 결 론

본 논문에서는 RF발진회로 기반의 고 신뢰도를 갖는 특수 분야에 사용되는 모델에 대하여 비교적 간단하고 단순한 실험을 통하여 안정되고 일정한 동작범위를 갖도록 하는 통계적인 모델링 방법을 제안하였다. 실제 사례를 보면 규정부품을 사용하였으나, 최적 조합을 하지 않은 상태에서 제품을 제작, 평가하였을 때의 생산 직행 수율은 40%를 초과하지 못하였다. 그러나 본 논문에서 제안한 최적화 모델링 결과, 95% 이상의 직행수율을 나타내어 약 두 배수 이상의 품질향상 및 생산성 개선효과를 보여주었다.

일반적으로 제품 설계 시 기본 회로와 그에 맞는 전자부품을 사용 할지라도 실제 사용 환경에서도 항상 균일한 성능을 발휘하도록 하는 것에는 한계가 따르게 된다. 이는 회로에 사용되는 소자들 각각이 모두 동일한 특성을 나타낼 수 없기 때문인데, 특히 고주파 회로의 경우는 주변 환경을 포함한 출력에 영향을 미치는 예측하기 어려운 변수들이 다양하게 분포하고 있기 때문이기도 하다.

따라서 랜덤하게 분포하도록 한 실험 데이터와 대상 회로를 구성하는 각 성분의 평균과 분산을 통한 통계적 분포의 분석만으로도 충분히 회로가 요구하는 규격을 만족시킬 수 있는 모델링 방법을 제시하였다. 본 논문에서 제안한 모델링 방법은 전자회로 뿐 만이 아니라 다양한 산업분야에 모두 응용 할 수 있으며, 설계자의 설계 적합성을 입증하기 위한 하나의 도구로써 충분한 활용가치가 있으리라 기대된다.

이 논문은 교육과학기술부(지역거점연구단육성사업/바이오하우징연구사업단) 및 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 유형래, “850MHz대역 VCO 설계 및 제작”, 수원대학교 석사학위논문, pp. 13-15, 2001.12.
- [2] 고윤수, 홍성용, 김기수, 손호원, “세라믹 적층기술을 이용한 초소형 VCO”, 한국전자과학회논문지, 10권, 제1호, pp.70-77, 1999.
- [3] Robert Boylestad Louis Nashelsky, *Electronic Devices and Circuit Theory*, 사이텍미디어, pp. 595-601, 1999.

- [4] 고승곤, *통계적 사고와 현상 분석 : Dr. Ko's Practical Guidance for Industry*, LG Electronics, 2003.
- [5] LG Electronics, *R&D 6α*, LG Elec. Multimedia Division, 1999.
- [6] William H. Hayt, Jr., *Engineering Electromagnetics (Forth Edition)*, Mc Graw-Hill Book Company, pp. 360-385, 1985.
- [7] M.E. Van Valkenburg, *Network Analysis (Third Edition)*, Prentice Hall, pp. 372-395, 1986.
- [8] William Rynone, Jr., *Linear Active Circuit-Design and Analysis*, Artech House, INC., pp. 337-364, 1986.
- [9] 김인석, 나극환, 신철재, 유기석, 윤영중, 이영철, 이재욱, 전계석, 최익권, "초고주파 공학", *대한전자공학회*, pp. 29-35, 2000. 8.
- [10] A. J. Blodgett, "A Multilayer Ceramic Multichip Module", *IEEE Trans. Components, Hybrids Manuf. Technol.*, Vol. 3, No. 4, pp. 634-637, 1980
- [11] B.T. Clark, Y.M. Hill, "IBM Multichip Multilayer Ceramic Modules for LSI Chips : Design for Performance and Density", *IEEE Trans. Components, Hybrids Manuf. Technol.*, Vol 3, No. 1, pp. 89-93, 1980.
- [12] Guillermo Gonzalez, *Microwave Transistor Amplifiers Analysis and Design (2nd Edition)*, Prentice Hall, 1997.

**저 자 소 개**

**임영철(任永徹)**



1953년 4월 23일생. 1975년 전남대 전기공학과 졸업. 1977년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1997년 호주 모나시대 Visiting Scholar. 1998년~2007년 산업자원부 지정 전남대 고품질 전기전자부품 및 시스템 연구센터(RRC)소장. 현재 전남대 전기공학과 교수. 2009년 당 학회 회장 역임.

**김관우(金冠佑)**



1966년 6월 9일생. 1991년 조선대 공대 전자공학과 졸업. 2006년~현재 지에프텍(주) 기술연구소 책임연구원. 현재 전남대 대학원 전기공학과 석사과정.

**최진봉(崔珍鳳)**



1966년 6월 7일생. 1991년 전남대 공대 전자공학과 졸업. 2007년~현재 지에프텍(주) 기술연구소 책임연구원. 현재 전남대 대학원 전기공학과 석사과정.

**정영국(鄭榮國)**



1963년 11월 10일생. 1986년 전남대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 2000년 일본 오카야마대학 연구방문. 현재 대불대 융합기술학부 부교수.