

공학 석사 학위논문

바랙터 다이오드를 이용한 X-밴드
전압제어 발진기 개발

Development of X-band Voltage Controlled
Oscillator using Varactor Diode



지도교수 박동국

2009년 2월

한국해양대학교 대학원

전자통신공학과

윤 나라

本 論 文 을 尹 娜 邏 의 工 學 碩 士
學 位 論 文 으 로 認 准 함 .

위원장 沈 俊 煥 (인)

위 원 孫 慶 洛 (인)

위 원 朴 東 國 (인)

2009년 2월

한국해양대학교 대학원

목 차

Abstract

제 1장 서론 -----	1
제 2장 발진회로의 기본원리 -----	3
2.1 발진 조건 -----	3
2.2 트랜지스터 발진기 -----	8
제 3장 전압제어 발진기의 설계 및 제작 -----	10
3.1 전압제어 발진기 구성 -----	12
3.2 전압제어 발진기 설계 -----	16
3.3 전압제어 발진기 제작 및 고찰 -----	34
제 4장 결론 -----	42
참고문헌 -----	43



표 차 례

<표 1.1> 근거리 무선통신(5.5GHz) 전압제어 발진기 -----	11
<표 1.2> X-밴드(8~12.5GHz) 전압제어 발진기 -----	11
<표 3.1> 제작된 전압제어 발진기 측정 결과 -----	41

그 림 차 례

<그림 2.1> 반사계수 관점에서의 발진기 해석 -----	5
<그림 2.2> 임피던스 관점에서의 발진기 해석 -----	7
<그림 2.3> 전달함수 관점에서의 발진기 해석 -----	8
<그림 2.4> 2-단자망 발진기 모델 -----	8
<그림 3.1> 전압제어 발진기의 구성도 -----	12
<그림 3.2> 트랜지스터(FET)구조 및 V-I곡선 -----	13
<그림 3.3> $\lambda_g/4$ 라디얼 스테브 -----	14
<그림 3.4> 바랙터 다이오드 구조와 커패시턴스 변화 -----	15
<그림 3.5> 트랜지스터(FET) 동작점 결정 회로-----	17
<그림 3.6> 트랜지스터(FET) V-I 특성곡선 -----	18
<그림 3.7> 직렬-궤환 회로가 추가된 트랜지스터 구조 -----	18
<그림 3.8> 10GHz일때의 트랜지스터(FET) 동작 -----	21
<그림 3.9> 직렬-궤환 요소 추가 회로 -----	22
<그림 3.10> 직렬-궤환 요소 추가 이전의 안정화 계수 -----	22
<그림 3.11> 직렬-궤환 요소 추가 한 후 안정화 계수 -----	23
<그림 3.12> 공진부 회로 -----	24

<그림 3.13> 공진부 측정 결과 -----	24
<그림 3.14> 직렬-계환회로 및 공진부를 포함한 회로 -----	25
<그림 3.15> 커패시턴스 변화에 따른 Z_{OUT} 의 임피던스 (부성저항) --	26
<그림 3.16> 커패시턴스 변화에 따른 Z_{OUT} 의 리액턴스 -----	26
<그림 3.17> 출력측 정합회로 -----	27
<그림 3.18> 출력측 정합회로 임피던스 -----	28
<그림 3.19> 최적화 된 출력측 정합회로 임피던스 -----	28
<그림 3.20> 전압제어 발진기 최종 회로 -----	30
<그림 3.21> 전압제어 발진기 주파수 및 출력전력(C=1.1pF) -----	31
<그림 3.22> 전압제어 발진기 주파수 및 출력전력(C=2.5pF) -----	32
<그림 3.23> ADS를 이용한 주파수 및 출력변화 -----	33
<그림 3.24> 전압제어 발진기 설계 도면과 실물 사진 -----	34
<그림 3.25> 실험 측정 장비구성 -----	35
<그림 3.26> 전압제어 발진기 주파수 측정결과 -----	36
<그림 3.27> 제어 전압에 따른 전압 제어 발진기 출력 -----	37
<그림 3.28> 제어 전압 변화에 따른 발진주파수 및 출력전력 변화 --	38
<그림 3.29> 발진시 위상잡음 특성 -----	39
<그림 3.30> 전압제어 발진기의 모의실험과 측정치 비교 -----	40

Abstract

A VCO (Voltage Controlled Oscillator) has been designed and fabricated at X-band frequency. The design parameters are optimized through ADS simulation tool. The operating characteristics and performance analysis of the implemented VCO based on the design parameters are accomplished. To tune the range of VCO, varactor diode has been connected at the tunable negative resistance in VCO. A VCO for enhancing the fundamental frequency 10.50GHz~10.88GHz has been designed and fabricated in microstrip configuration on 0.508mm thick RT-duroid($\epsilon=2.33$) Teflon substrate. The frequency variations according to the voltage change 1~18V of varactor diode are from 10.50GHz~10.88GHz and power level is 4.0~4.6dBm. The phase noise characteristics are -40.5dBc/Hz, -52.4dBc/Hz at 100KHz offset frequency.

Developed VCO is expected to be used for local oscillator which is one of the main device of radar system.

제 1장 서 론

레이더 시스템에서 신호원으로 동작하는 부품 중의 하나인 발진기는 DC전력을 RF전력으로 변환시키는 회로로서 전체 시스템에 있어서 가장 기본적이고 필수적인 부품중의 하나이며 특히, 시스템의 IF 신호를 만들거나 RF신호를 변·복조할 때 효율과 안정성 확보에 가장 큰 영향을 미치는 소자이다.

레이더 시스템에서의 발진기는 주파수 조절이 자동적으로 일어날 수 있어야하며, 자동적으로 주파수를 조절할 수 있는 한 가지 방법은 전압 제어 발진기를 이용하는 것이다.

이에 따라 본 논문에서는 선박의 유량 및 거리측정을 위한 X-밴드 레이더의 신호원으로 동작할 수 있는 전압제어 발진기 제작을 목표로 하였다.

기존의 전압제어 발진기의 논문을 정리한 결과, 5.5GHz인 근거리 무선 통신에서는 주파수 대역폭이 100~540MHz, 출력 전력은 -13~11dBm이었고 위상잡음은 -15~-127dBc/Hz인 특징을 가졌다[1]~[10]. X-밴드 주파수 내에서는 주파수 대역폭이 15MHz~1.3GHz, MMIC 공정에서는 430MHz정도의 대역폭을 가졌다. 출력 전력은 -11~5.8dBm이었고 위상잡음은 -16~-115dBc/Hz인 전압제어 발진기가 제작되었다[11]~[15]. 본 논문에서는 X-밴드 레이더 신호원으로 동작할 수 있는 전압제어 발진기의 초기 모델로서 연구목표를 주파수 대역폭은 200MHz, 출력전력은 5dBm, 위상잡음은 -60dBc/Hz로 설정 하였다.

본 논문에서 설계하는 전압제어 발진기는 MITSUBISHI사의 ATF1403 FET와 MA-COM사의 MA46H201 바랙터 다이오드(Varactor Diode)소자

및 마이크로 스트립 라인을 이용하여 발진부를 구성하고 개방 스테르브를 이용하여 출력 측 정합 회로를 구성하였다. 구현된 회로는 HP사의 ADS를 이용하여 최적화하였다.

최적화된 회로는 유전상수는 2.33이고 두께는 0.508mm인 Rogers사의 RT - duroid 5870 기판 위에 구현하여 10.50~10.88GHz에서 사용할 수 있는 전압제어 발진기를 제작하였다.



제 2장 발진회로의 기본원리

발진기는 DC전력을 RF전력으로 변환하는 것이며 따라서 시스템의 가장 기본적이고 필수적인 소자라고 할 수 있다. 발진기는 정현파 RF신호를 만들기 위해 다이오드나 트랜지스터 같은 능동소자를 수동회로와 함께 사용한다. 발진기는 초기신호가 과도상태나 잡음 등에 의해 트리거되며, 공진부에 의해 안정한 발진상태에 도달하게 된다. 이 과정은 능동소자가 비선형특성이 되도록 하며 발진기는 RF전력을 생성해 내는 것이기 때문에 부성저항을 가져야만 한다.

발진기는 근본적으로 비선형회로이지만 선형해석방법이 회로해석과 설계에 있어 유용하게 쓰여진다. 선형해석방법으로는 발진 신호의 크기에 대한 정보는 얻을 수 없지만 발진주파수에 대해서는 정확한 예측을 할 수 있으므로 발진기 설계에는 선형해석방법이 널리 사용되어진다. 여기서는 먼저 발진조건에 대해 반사계수로 해석하고 다음으로 임피던스에 의한 방법, 마지막으로 전달함수로 보는 방법으로 각각 설명하였다[16]. 또한 본 논문에서 제안한 전압 제어 발진기는 트랜지스터를 이용하므로 트랜지스터 발진기에 대해 설명하였다.

2.1 발진조건

선형해석방법으로 보는 발진조건은 발진기가 정상상태에 있을 때를 가정하고 서술한 것이다. 따라서 아래에 서술하는 반사계수, 임피던스 전달함수 들은 반드시 소신호 파라미터와 구분되어야 한다.

2.1.1 반사계수에 의한 해석

<그림 2.1>에서 정의한 바와 같이 발진부 측를 들여다 본 반사계수를 Γ_G 라 하고 이에 연결된 부하측(Load)을 들여다 본 반사계수를 Γ_L 라 하며, 연결단자에서 부하측위 입사파와 반사파를 각각 a_1 및 b_1 이라 할때 정상상태에서 각 성분의 관계를 보면

$$\begin{aligned} a_1 &= b_1 \Gamma_G \\ &= a_1 \Gamma_L \Gamma_G \end{aligned} \quad (2.1)$$

이다. 다시 정리하여 보면

$$a_1(1 - \Gamma_L \Gamma_G) = 0 \quad (2.2)$$

과 같다. 식 (2.2)에서 <그림 2.1>의 회로가 발진기가 되기 위해서는 a_1 이 유한한 값을 가져야 하므로

$$1 - \Gamma_L \Gamma_G = 0 \quad (2.3)$$

또는 Γ_L , Γ_G 를 위상을 표시하여 각각 $\Gamma_L = |\Gamma_L| \exp(j\theta_L)$, $\Gamma_G = |\Gamma_G| \exp(j\theta_G)$ 이라 할때

$$|\Gamma_L \Gamma_G| = 1 \quad (2.4)$$

$$\theta_L + \theta_G = 0 \quad (2.5)$$

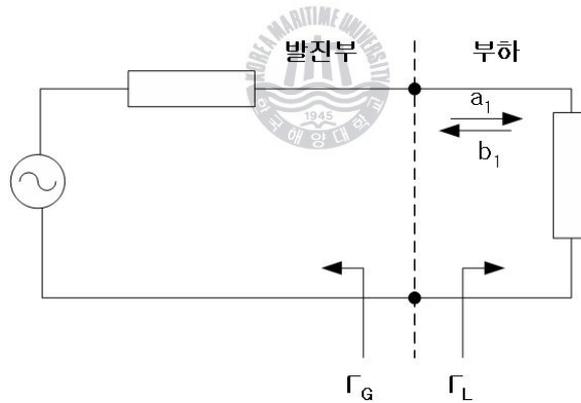
가 되어야 한다.

일단 발진이 시작되면 트랜지스터의 산란 파라미터(Scattering Parameter) 값들이 달라진다. 발진 시작 시 소신호의 Γ_L' 과 Γ_G' 는

$$|\Gamma_L' \Gamma_G'| > 1 \quad (2.6)$$

$$\theta_{L'} + \theta_{G'} = 0 \quad (2.7)$$

이 되도록 설계하여야 하는데 정상상태에 도달하면 달라진 $\Gamma_L' \Gamma_G'$ 값이 식 (2.4)를 만족하게 한다. 이때 식 (2.4)과 식 (2.5)를 정상상태의 발진조건이라 한다.



<그림 2.1> 반사계수 관점에서의 발진기 해석

2.1.2 부성저항에 의한 해석

발진기의 출력측 임피던스를 $R_G + jX_G$ 라 하고 부하측 임피던스를 $R_L + jX_L$ 이라 할때 정상상태에서 키르히호프 전압법칙 (KVL) 을 적용

하면

$$[(R_G + R_L) + j(X_G + X_L)] I = 0 \quad (2.8)$$

이다. 발전하기 위해서는 <그림 2.2>의 회로에 전압이 없을 때도 유한한 전류 I가 흘러야 하므로

$$R_G + R_L = 0 \quad (2.9)$$

$$X_G + X_L = 0 \quad (2.10)$$

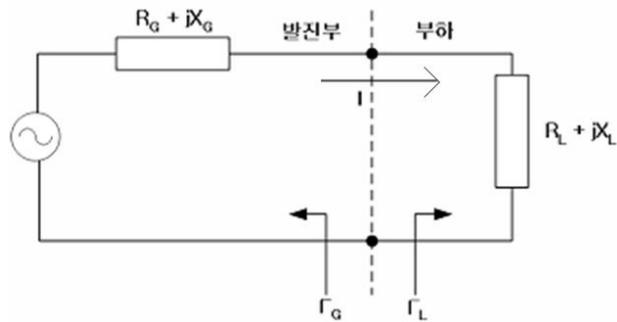
식 (2.9)과 식 (2.10)이 동시에 만족하여야 하는데 이것이 정상상태의 발전조건이 된다.

R_L, R_G, X_L, X_G 이 모두 소신호 산란파라미터로부터 얻어진 값이라면 최대의 출력으로 발전하기 위해서는

$$3R_G + R_L = 0 \quad (2.11)$$

$$X_G + X_L = 0 \quad (2.12)$$

을 만족하도록 설계한다고 알려져 있다.



<그림 2.2> 임피던스 관점에서의 발전기 해석

2.1.3 전달함수에 의한 해석

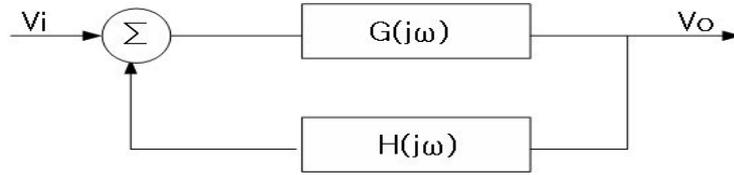
<그림 2.3>과 같이 능동소자를 포함한 회로의 전달함수를 $G(j\omega)$ 라 하고
 권환 회로의 전달함수를 $H(j\omega)$ 라 할때 정상상태에서 출력 V_0 는

$$V_0 = V_I \frac{G(j\omega)}{1 + G(j\omega)H(j\omega)} \quad (2.13)$$

발전하기 위해서는 입력 V_I 가 0일때 유한한 출력 V_0 가 나와야 하므로

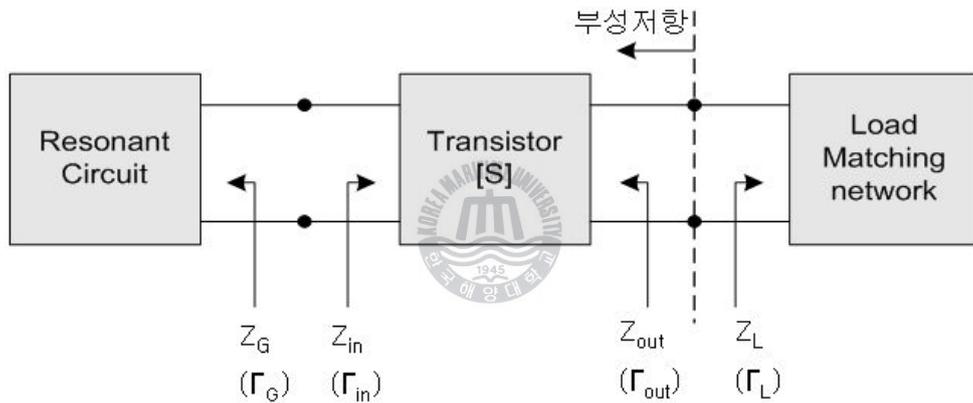
$$1 + G(j\omega)H(j\omega) = 0 \quad (2.14)$$

이때 식 (2.14)가 정상상태의 발전조건이 된다[17].



<그림 2.3> 전달함수관점에서의 발진기 해석

2.2 트랜지스터 발진기



<그림 2.4> 2-단자망 발진기 모델

트랜지스터 단자가 세 개이지만 한 단자는 입력과 출력에 공통으로 이용되므로 2-단자망 발진기 모델로 보고 해석하면 편리하다. <그림 2.4>는 2-단자망 발진기 모델을 보이고 있는데 입력 정합회로와 출력 정합회로로 나뉜다. 입력 정합회로는 발진이 시작되기 위해 $|\Gamma_{OUT}| > 1$ 이 되도록 해주며, 공진기에 의해서 발진 주파수가 결정된다. 출력 정합회로는 부하에 전달되는 전력의 크기를 결정해 준다.

능동소자를 포함한 2-단자망 해석에서 반사계수와 안정화 계수를 이용

한 발진조건을 표시하면 다음과 같다[18][19].

$$\Gamma_{in}\Gamma_G = 1 \quad (2.15)$$

$$\Gamma_{OUT}\Gamma_L = 1 \quad (2.16)$$

$$K = \frac{1 + |\Delta| - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2}{2 |S_{12}S_{21}|} < 1 \quad (2.17)$$

여기서 $\Delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}$ 이다.

식 (2.17)에서 K는 안정화 계수로서, 발진을 하기 위해서 발진 주파수는 소자의 불안정한 영역에 있어야 하므로 안정화 계수는 1보다 작아야 한다. 발진기 회로를 설계할 때는 설정 주파수에서 불안정한 특성을 갖는 트랜지스터를 초기에 선택하여 사용해야 한다. 그렇지 않으면 공통 단자에 부품을 첨가하여 특성을 변화시켜 불안정하게 만들어 주거나 출력의 일부를 정궤환 시켜 주어야 한다.

발진기의 발진 주파수는 공진기의 공진 주파수에 종속 된다. 발진 주파수대에서 불안정영역에서 동작 하고 입력에서 큰 값의 부성 저항 값을 갖도록 공진부를 첨가 시켜야 한다.

발진기의 발진 주파수는 공진기의 공진 주파수를 따라 변하게 된다. 이런 주파수 변화를 이용하여 전압제어 발진기를 제작하며, 공진 주파수 변화를 위해서는 바랙터 다이오드를 사용한다.

최적의 Z_{OUT} 을 이용하여 부하 임피던스 Z_L 을 결정한다. 최대 전력을 발생시키기 위한 부하 임피던스 Z_L 의 허수부와 실수부는 다음 조건식을 만족시켜야 한다[20].

$$I_m(Z_L) = -I_m(Z_{OUT}) \quad (2.18)$$

$$Re(Z_L) = \frac{1}{3} |Re(Z_{OUT})| \quad (2.19)$$

제 3장 전압제어 발진기의 설계 및 제작 특성

본 논문에서 제안된 전압제어 발진기는 제어 전압을 조정하여 발진기 출력신호의 주파수를 제어하는 회로이다. 기존의 전압제어 발진기의 논문을 정리한 <표 2.1>를 살펴보면, 5.5GHz인 근거리 무선통신에서는 주파수 대역폭이 100~540MHz, 출력 전력은 -13~11dBm이었고 위상잡음은 -15~-127dBc/Hz인 특징을 가졌다[1]~[10]. 또한 <표 2.2>에서와 같이 X-밴드 주파수 내에서는 주파수 대역폭이 15MHz~1.3GHz, MMIC 공정에서는 430MHz정도의 대역폭을 가졌다. 출력 전력은 -11~5.8dBm이었고 위상잡음은 -16~-115dBc/Hz인 전압제어 발진기가 제작되었다[11]~[15]. 본 논문에서는 X-밴드 레이더 신호원으로 동작할 수 있는 전압제어 발진기의 초기 모델로서 연구목표를 주파수 대역폭은 200MHz, 출력전력은 5dBm, 위상잡음은 -60dBc/Hz로 설정 하였다.

<그림 3.1>는 본 논문에서 제안한 전압 제어 발진기의 구조를 나타낸다. 전압제어 발진기를 설계하는 가장 일반적인 방법은 트랜지스터를 이용하는 것이다. 트랜지스터는 증폭을 하고 귀환 회로를 이용하여 부정저항을 만들며 발진을 유지시킨다. 만약 공진조건이 만족되어지면, 발진 전력은 출력에 전달된다. 트랜지스터가 불안정 영역에서 동작될 때 발진은 발생하므로 발진 주파수대에서 불안정 영역에서 동작하도록 X_1 을 추가하였다. 귀환 요소 X_1 를 결정한 후에는, X_1 과 X_2 의 조합에 의해 변하는 출력임피던스 Z_{OUT} 이 발진 주파수대에서 부정저항을 갖도록 ADS 시뮬레이션을 이용하여 최적화 하였다. 또한 제안된 전압제어 발진기의 발진 주파수를 조절하기 위하여 바랙터 다이오드를 연결하였다[21].

출력은 ADS 시뮬레이션에 의해 추출된 최적의 Z_{OUT} 을 이용하여 부하

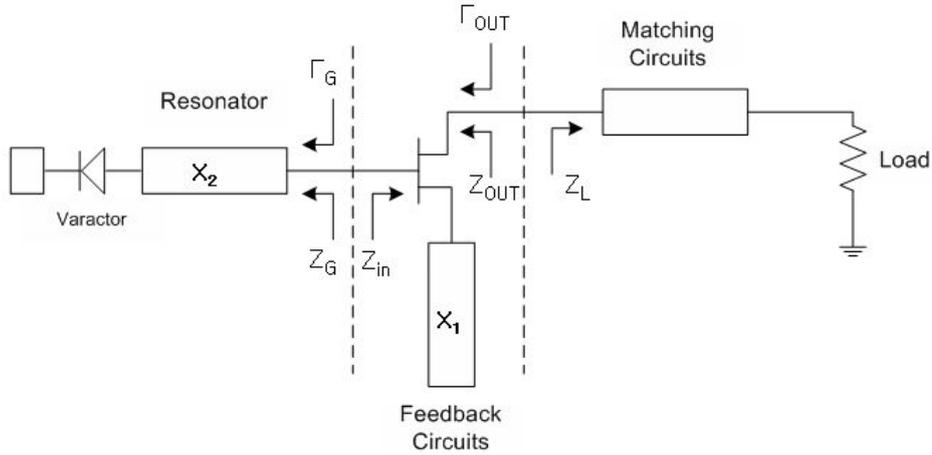
임피던스 Z_L 을 결정 하여 최대 전력을 전달 할 수 있도록 설계 하였다.

<표 1.1> 근거리 무선통신(5.5GHz) 전압제어 발진기

	동작 주파수(GHz)	출력 전력(dBm)	위상잡음		비 고
			(dBc/Hz)	오프셋	
사례1 [1]	5.74~5.85	4.83	-116.16	@100KHz	
사례2 [2]	5.41~5.84	7	-25	@100KHz	
사례3 [3]	5.74~5.85	4.83	-112.33	@100KHz	
사례4 [4]	5.69~5.84	11.83	-115.16	@100KHz	
사례5 [5]	5.75~5.86	12.33	-120	@100KHz	
사례6 [6]	5.74~5.84	8.17	-127.5	@100KHz	
사례7 [7]	5.42~5.52	6.5	-83.81	@10KHz	
사례8 [8]	5.74~5.86	8.67	-15	@100KHz	
사례9 [9]	5.01~5.30	0	-87.8	@100KHz	CMOS
사례10 [10]	5.35~5.89	-13	-113	@1MHz	CMOS

<표 1.2> X-밴드(8~12.5GHz) 전압제어 발진기

	동작 주파수(GHz)	출력 전력(dBm)	위상잡음		비 고
			(dBc/Hz)	오프셋	
사례1 [11]	9.41~9.46	-2	-16	@100KHz	
사례2 [12]	12.05~12.065	5.8	-114	@100KHz	
사례3 [13]	8.67~10.037	0.67~5.17	-	@100KHz	
사례4 [14]	10.9~11.8	-11~2	-115	1MHz	Push-Push
사례5 [15]	11.65~12.08	-4.3	-108	1MHz	MMIC



<그림 3.1> 전압제어 발진기의 구성도

3.1 전압제어 발진기 구성

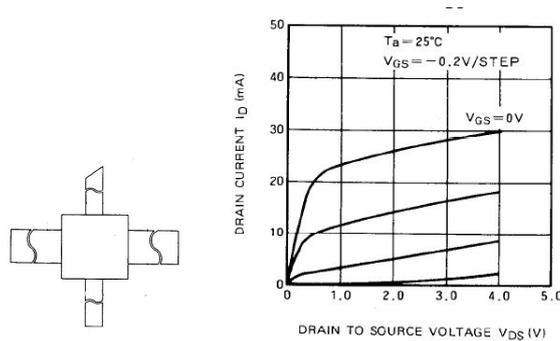


3.1.1 트랜지스터 (FET)

본 논문에서는 X-밴드에서 작동하는 전압제어 발진기 설계를 위해 능동소자로써 MITSUBISHI사의 MGF1403B(GaAs FET)를 사용하였으며, 발진기 설계를 위해 필요한 능동소자의 모델은 비선형 설계 도구인 ADS에 포함된 Library에서 지원하는 비선형 모델을 이용하였다. <그림 3.2>는 사용한 트랜지스터(FET)의 구조 및 V-I 특성 곡선을 나타낸다.

트랜지스터(FET)의 동적점 결정은 설계 목표치 중 출력레벨 및 위상잡음을 고려하여 결정해야한다. 일반적으로 높은 드레인-소스 전류는 출력 전력이 증가하고, 높은 드레인-소스 전압은 위상잡음이 증가하는 특징이 있다. 특히 $1/f$ 잡음은 발진회로의 발진 신호와 주변 저주파 잡음과 주

과수 혼합에 의해 나타나므로 DC 바이어스점, 능동 소자에 서 본 RF 부하곡선, RF 주파수 대역에서 임피던스의 주파수 의존성 등에 의해 영향을 받는다. 따라서 트랜지스터의 V-I 특성 곡선으로부터 출력과 위상 잡음을 고려하여 동작 점을 선택하였다

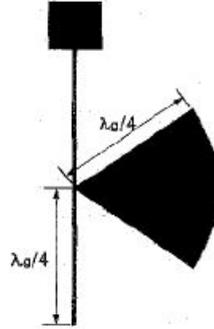


<그림 3.2> 트랜지스터(FET)구조 및 V-I 특성 곡선

3.1.2 라디얼 스템브 (Radial Stub)



바이어스(Bias) 회로는 원하는 DC전력을 FET에 전달하여 트랜지스터가 원하는 바이어스 동작 점에서 동작하도록 하고, 동시에 RF 신호가 DC 경로로 흘러 나가는 것을 막아야한다. 따라서, 발진하는 주파수의 신호가 바이어스 회로로 누설되는 것을 막기 위해서 $\lambda_g/4$ 라디얼 스템브를 이용하였다[22]. 이러한 스템브 형태의 바이어스 회로는 <그림 3.3>에 나타나 있다.



<그림 3.3> $\lambda_g/4$ 라디얼 스텐브

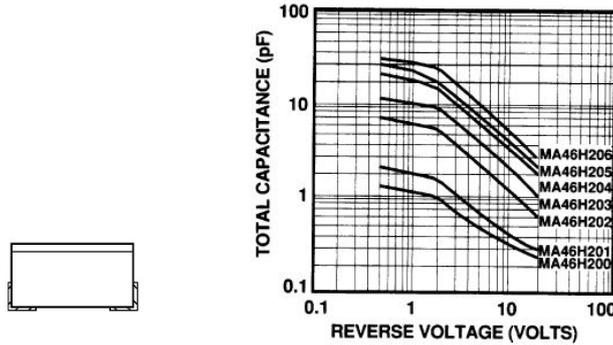
3.1.3 궤환 회로 (Feedback Circuit)

트랜지스터(FET)는 발진 하고자 하는 주파수에서 불안정 영역에서 동작하도록 직렬 궤환 요소를 첨가하여야 한다. 본 논문에서 사용한 트랜지스터(FET)는 X-밴드에서 안정하므로 직렬-궤환 요소를 첨가하여 불안정 영역에서 동작 하도록 하였다. 이는 ADS 시뮬레이션을 이용하여 불안정 영역에서 동작하도록 최적화 하였다.

3.1.4 바랙터 다이오드

바랙터 다이오드는 바이어스 전압에 따라서 커패시턴스가 변하게 된다. 전압 제어 발진기는 원하는 주파수 조절을 얻기 위하여 바랙터 다이오드를 사용한다. 바랙터 다이오드는 역 바이어스 아래에서 pn접합 커패시턴스의 전압 민감성을 이용한 두 개의 단자를 갖는 반도체 소자이다[23]. 본 논문에서는 MA-COM사의 MA46H201 제품을 사용하였다. <그림 3.4>은 MA46H201 바랙터 다이오드의 구조와 역방향 전압에 따른 커패시턴스

변화를 나타낸다. 이 제품은 Q가 3000이고 역방향 전압이 0~20V로 변할 때 정전 용량은 0.2pF ~ 2.5pF까지 바뀐다.



<그림 3.4> 바랙터 다이오드 구조와 커패시턴스 변화

3.1.5 공진부 (Resonator)



직렬 케환 요소를 결정한 후에는 공진기 값을 결정해야 한다. 회로가 원하는 주파수대에서 발진하기 위해서는 <그림 3.1>의 X_1 과 X_2 의 조합에 의해 변하는 출력 임피던스 Z_{OUT} 의 실수부분이 음수이어야 한다. 본 논문에서는 회로가 원하는 주파수대에서 부성저항을 갖도록 ADS 시뮬레이션을 이용하여 마이크로스트립 라인의 형태의 최적의 Z_{OUT} 값을 결정하였다.

3.1.6 정합 회로 (Matching circuit)

정합 회로에서는 <그림 3.1>의 최적의 Z_{OUT} 을 이용하여 부하 임피던스

Z_L 을 결정하였다. 부하임피던스 Z_L 과 Z_{OUT} 의 정합과 최대 전력을 발생시키기 위해서는 부하 임피던스 Z_L 의 허수부와 실수부는 식 (2.18), 식 (2.19)를 만족해야 한다. R_{OUT} 이 발진기 전력이 생성됨에 따라 ‘-’가 될 것이기 때문에

$$R_{OUT} + R_L < 0 \quad (3.1)$$

이 되도록 적절히 R_L 을 선정해야 한다. 그렇지 않으면 증가전력이

$$R_{OUT} + R_L > 0 \quad (3.2)$$

인 점까지 R_{OUT} 이 증가될 때 발진이 멈추게 될 것이다. 그러므로 실질적으로 부하임피던스의 허수부와 실수부는 식 (2.18), 식 (2.19)을 만족해야 한다.

3.2 전압제어 발진기 설계

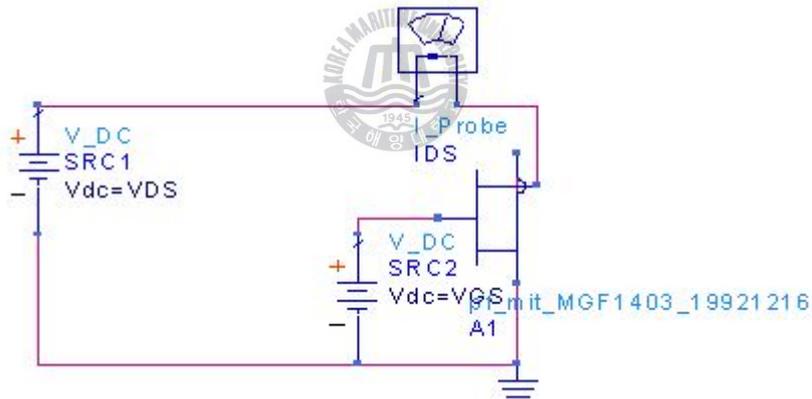
본 논문에서 설계한 전압제어 발진기는 직렬 궤환형 발진 회로로서 <그림 3.1>와 같은 구조를 갖는다. 발진회로는 크게 능동 소자를 포함하여 고주파를 생성시키는 부저항부와 발진 주파수를 결정하고 안정화 시키는 공진부, 부하에 최대 전력이 전달될 수 있도록 하는 임피던스 정합부로 되어있다.

이 모든 설계는 시뮬레이션 소프트웨어인 ADS를 이용하여 설계 하였으며 Library에서 지원하는 비선형 모델의 프로그래밍을 통해 최적의 마

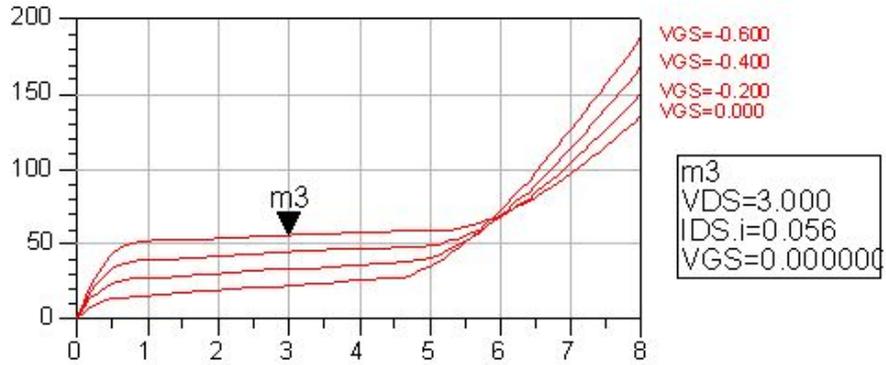
이크로스트립 라인의 형태와 크기를 결정하였다.

3.2.1 트랜지스터(FET) 동작점 결정

트랜지스터(FET)는 ADS Library에서 지원하는 MGF1403을 사용하여 시뮬레이션을 하였다. 트랜지스터(FET)의 동작점 결정은 설계 목표치 중 출력레벨 및 위상 잡음을 고려하여 동작 점을 $V_{DS} = 3V$ 이고, $V_{GS} = 0V$, $I_{DS} = 56\text{ mA}$ 인점을 선택하였다. <그림 3.5>은 트랜지스터(FET) 동작점 결정회로이며 <그림 3.6>은 트랜지스터(FET)의 V-I 특성곡선을 나타낸다.



<그림 3.5> 트랜지스터(FET) 동작점 결정회로

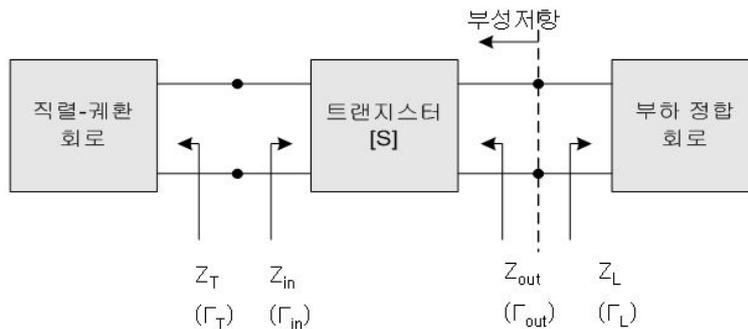


<그림 3.6> 트랜지스터(FET) V-I 특성곡선

3.2.2 직렬-궤환 회로

발진기로서 동작하기 위해서는 트랜지스터(FET)는 불안정한 영역에서 동작하여야 한다. 원하는 주파수대에서 트랜지스터(FET)가 불안정 하지 않을 경우 직렬-궤환 요소를 추가하여 불안정 하도록 만들어 주어야한다.

발진주파수 X-밴드의 중간 주파수대인 10GHz에서 트랜지스터(FET)가 불안정하도록 설계를 하였다.



<그림 3.7> 직렬-궤환 회로가 추가된 트랜지스터 구조

트랜지스터(FET)가 10GHz에서 불안정하기 위해서는 트랜지스터(FET)의 안정원을 그릴 필요가 있다. 먼저 <그림 3.7>의 트랜지스터(FET) 출력 반사 계수 Γ_{OUT} 은 아래 식과 같다.

$$\Gamma_{OUT} = S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_T}{1 - S_{11}\Gamma_T} \quad (3.3)$$

Γ_{OUT} 은 직렬-케환 회로에 의존하기 때문에 안정도는 회로에 표현된 Γ_T 에 의존하게 된다. 안정원은 Γ_T 평면에서 $|\Gamma_{OUT}| = 1$ 에 대한 궤적을 그리게 된다. 이때 안정원의 궤적은 Γ_T 에 대한 안정과 불안정 영역 사이의 경계를 결정하게 한다. $|\Gamma_{OUT}| = 1$ 인 궤적은 아래의 식을 통해 중심 C, 반경 R을 결정하게 된다[24][25].

$$C = \frac{(S_{22} - \Delta S_{11}^*)^*}{|S_{22}| - |\Delta|^2} \quad (3.4)$$

$$R = \left| \frac{S_{12}S_{21}}{|S_{22}|^2 - |\Delta|^2} \right| \quad (3.5)$$

위 식을 통해 스미스 차트상에 안정원을 그릴 수 있으며, 안정원의 경계에 따른 안정과 불안정 영역의 결정은 아래와 같다.

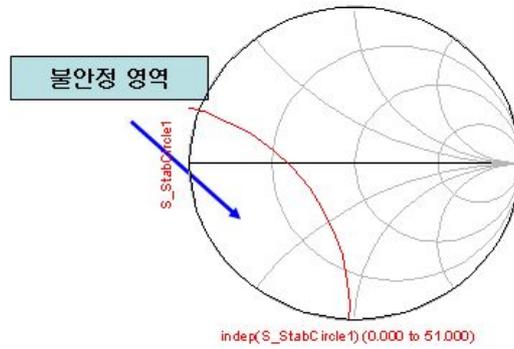
$Z_T = Z_0$ 로 고정시키면 $\Gamma_T = 0$ 이 되고 식 (3.3)을 통해 $|\Gamma_{OUT}| = |S_{22}|$ 가 된다. 만일 $|S_{22}| < 1$ 이면 $|\Gamma_T| < 1$ 이 되므로 $\Gamma_T = 0$ 은 안정영역에 있어야 하므로 스미스 도표의 중앙이 안정한 영역이 되고, 안정원 밖에 있는 영역은 불안정한 영역이 된다. 아래 <그림 3.8>의 (a)는

ADS프로그램을 이용한 트랜지스터(FET)의 안정원을 나타내며 <그림 3.8>의 (b)는 10GHz에서 불안정 하도록 불안정 영역의 한점을 정하였다. Z_0 를 임피던스 $Z_T = 9.036 - j5.830$ 가 되도록 직렬-궤환 요소인 스트립 라인을 추가 하였다.

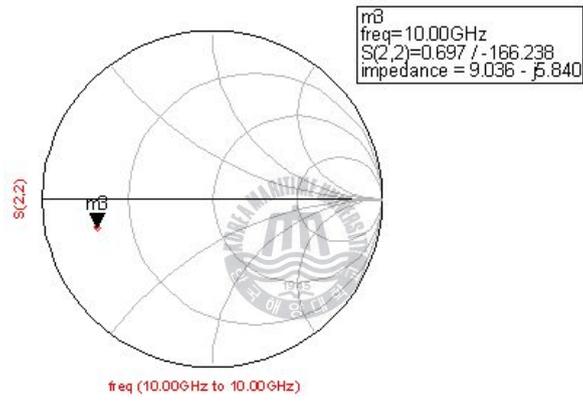
<그림 3.9>과 같이 추가된 스트립 라인의 폭은 트랜지스터 장착을 고려하여 2.567mm로 정한후, 스트립 라인의 길이를 조정하여 길이가 2.7429mm인 스트립 라인을 추가 하였다. 스트립 라인을 추가 후, 직렬로 저항을 연결하였다. 이는 잡음원으로 동작하며 트랜지스터(FET)가 더욱 불안정 하게 하는 역할을 한다. 추가된 저항은 56Ω 이 추가 되었으며, 이는 저항값의 변화에 의해 회로의 불안정함의 변화량이 컸다. 이에 따라 변화량이 작은 56Ω 인 저항을 추가하였다.

<그림 3.9>은 직렬-궤환 요소가 삽입된 회로를 나타내며 트랜지스터(FET) MGF1403소자는 소스단이 두 단자로 이루어져 있기 때문에 서로 같은 스트립 라인과 저항을 양쪽으로 연결해 주었다. 그리고 DC라인에는 라디얼 스테브를 추가하여 발진하는 주파수의 신호가 바이어스 회로로 누설되는 것을 막아 주었다.

트랜지스터(FET)에 직렬-궤환요소와 저항을 추가하기 전 안정화 계수는 <그림 3.10>과 같이 1보다 큰 값을 보이며 안정한 것을 알 수 있다. 궤환 회로를 첨가 한 후, <그림 3.11>와 같이 안정화 계수가 1보다 작은 불안정한 영역에 위치하였다.

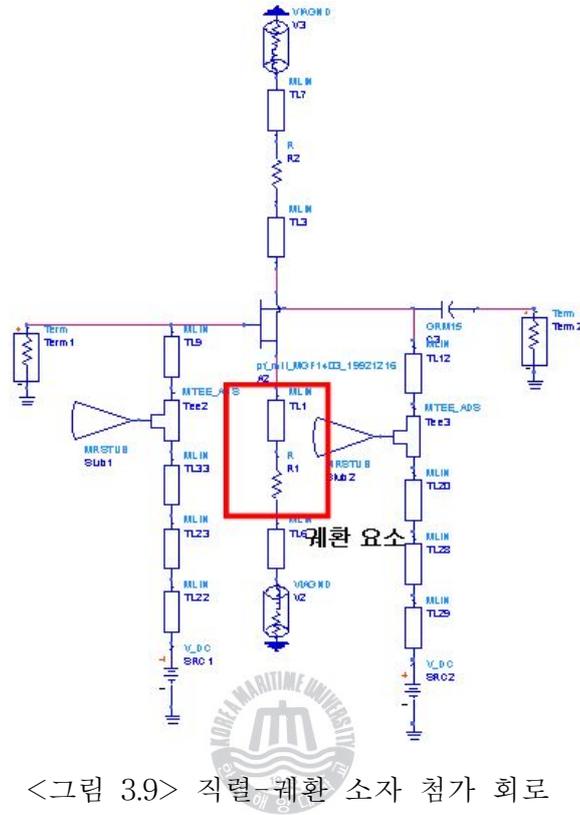


(a) 트랜지스터(FET) 안정원 (10GHz)

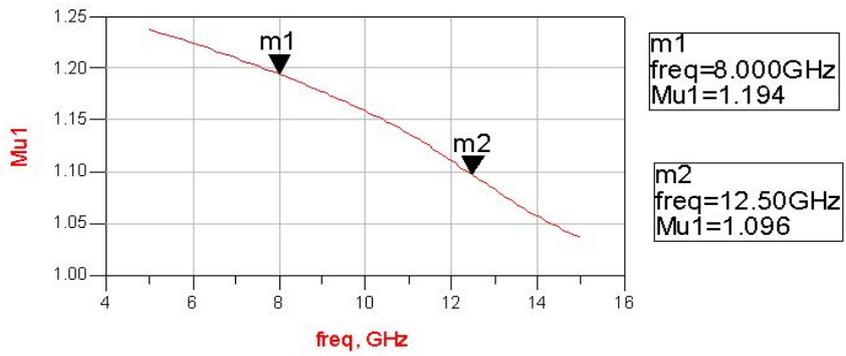


(b) 직렬-궤환요소 삽입후 회로 동작위치 (10GHz)

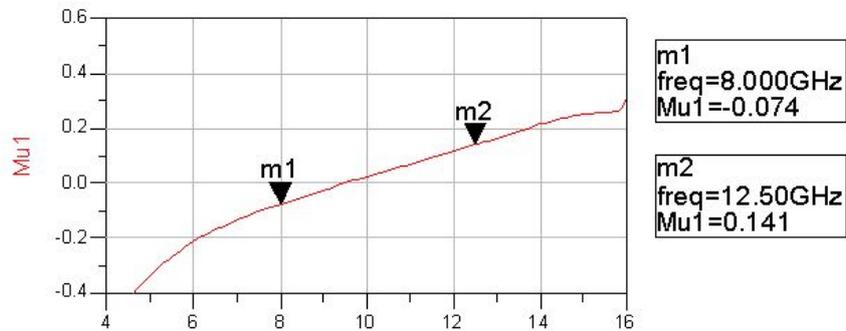
<그림 3.8> 10GHz일때의 트랜지스터(FET) 동작



<그림 3.9> 직렬-궤환 소자 첨가 회로



<그림 3.10> 직렬-궤환 소자 추가 이전의 안정화계수



<그림 3.11> 직렬-궤환 소자 추가 한 후 안정화 계수

3.2.3 공진부

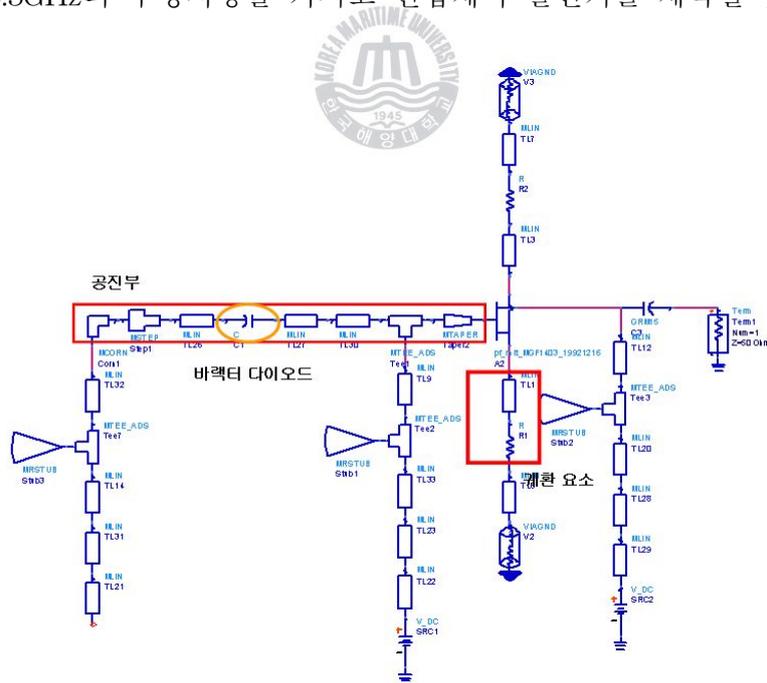
전압제어 발진기의 트랜지스터(FET)가 불안정 하도록 직렬-궤환 요소를 삽입한 후, 원하는 주파수대에서 부정저항을 갖도록 공진부를 설계하여, 발진 주파수대에서 부정저항을 갖는지 확인하였다. 즉, 직렬-궤환회로와 공진부의 조합에 의해 <그림3.1>의 출력 임피던스 Z_{OUT} 의 실수부분이 음수이어야 한다.

공진기는 바랙터 다이오드의 커패시턴스와 스트립 라인의 인덕터 값에 의해 공진주파수가 결정된다. 초기 공진기의 모습은 바랙터 다이오드와 인덕터로 동작하는 스트립 라인으로 이루어진 단순한 형태였지만, 전압제어 발진기의 제작을 고려하여 스트립 라인을 수정하였다[26][27].

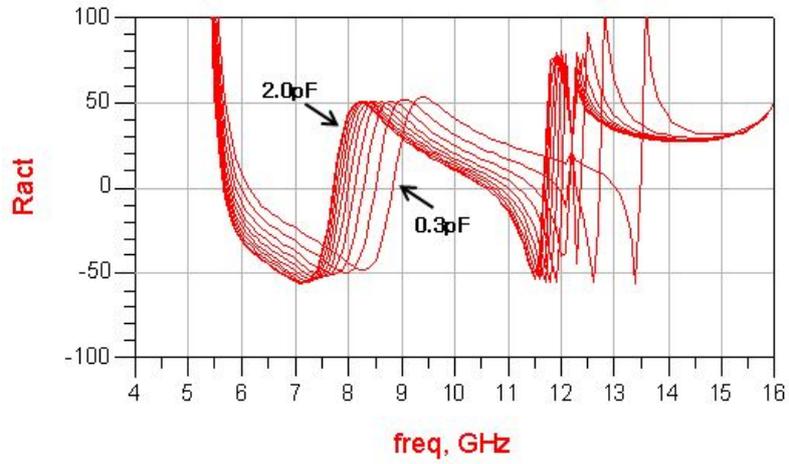
<그림 3.12>은 공진부와 전압제어 발진기 제작을 위한 레이아웃을 나타낸다. 그림에서와 같이 트랜지스터(FET)의 장착을 고려하여 게이트(Gate) 단은 스트립 라인을 테이퍼(Taper)모양으로 수정하였으며, 바랙터 다이오드의 장착을 위해 양쪽으로 스트립 라인을 추가하였다. 이에 따라 공진부의 모양은 <그림 3.12>와 같이 변화 하게 되었고, <그림 3.13>는

설계된 공진부와 앞에서 설계한 직렬-궤환요소를 연결한 회로는 <그림 3.14>와 같다. 바랙터 다이오드는 ADS Library에서 지원을 하지 않은 관계로 커패시턴스(Capacitance)의 변화량을 주면서 시뮬레이션을 하였다.

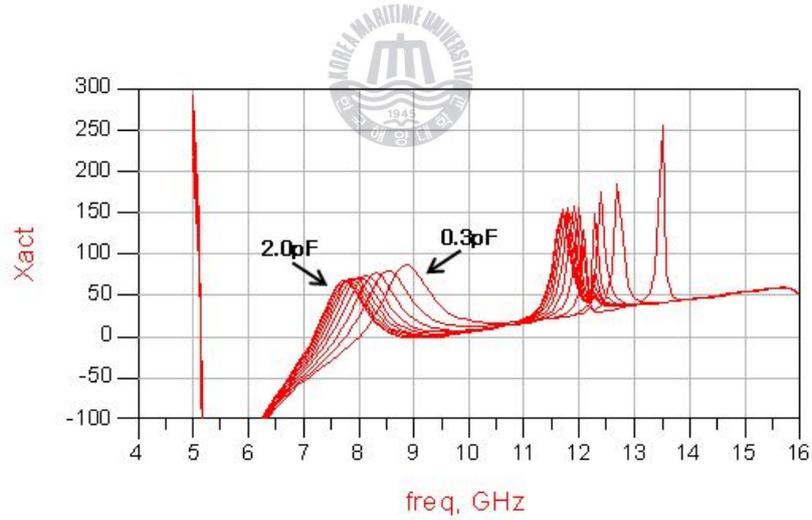
그 결과 <그림 3.15>은 부성저항을 나타내며, <그림 3.16>은 리액턴스 값을 나타낸다. 붉은 선의 변화량은 바랙터 다이오드의 커패시턴스 변화를 나타내고 있다. 부성저항을 나타내는 <그림 3.15>에서, X-밴드 주파수대 내에서는 8~8.9GHz, 10.5~12.5GHz에서 부성저항을 가지고 있는 것을 확인할 수 있었다. 다음 단계에서의 출력측 정합회로 설계 시, 10.5~12.5GHz 주파수대를 정합할 것이다. 이에 따라 다른 주파수대에서의 부성저항은 출력측 정합회로의 임피던스에 의해 부성저항을 나타나지 않게 된다. 직렬-궤환회로와 공진부의 조합에 의해 설계된 회로는 X-밴드대인 10.5~12.5GHz의 부성저항을 가지고 전압제어 발진기를 제작할 것이다.



<그림 3.14> 직렬-궤환회로 및 공진부를 포함한 회로



<그림 3.15> 커패시턴스 변화에 따른 Z_{OUT} 의 임피던스(부성저항)



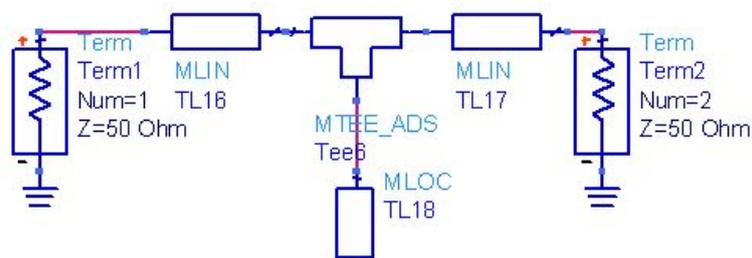
<그림 3.16> 커패시턴스 변화에 따른 Z_{OUT} 의 리액턴스

3.2.4 부하정합회로

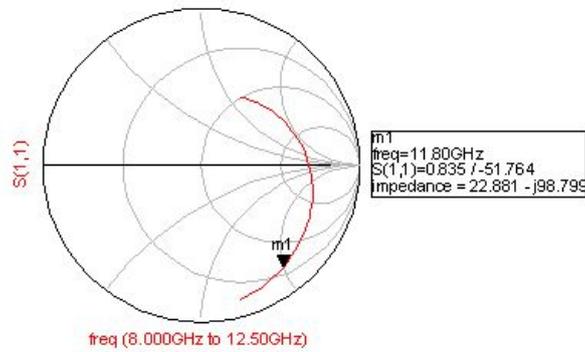
부하 정합 회로는 설계 주파수에서 최대의 전력을 가져다 주도록 결정하여야 하며 부하 임피던스는 일반적으로 식(2.18), 식(2.19)으로서 결정된다.

전압제어 발진기는 하나의 주파수로 고정이 되지 않고 바랙터 다이오드에 의해서 공진주파수가 변화하기 때문에 하나의 주파수로 고정을 하고 부하 정합회로를 설계하였다. <그림 3.15>의 부성저항에서 11.8GHz의 주파수를 선택하여 부하 정합회로를 설계하였다. 11.8GHz에서 바랙터 다이오드의 커패시턴스 값이 1.1pF일때 <그림 3.1>에서의 $Z_{OUT} = -68.37 + j98.626$ 이며, 이것을 이용하여 부하 정합회로는 식(2.18), 식(2.19)을 이용하여 $Z_L = 22.79 - j98.626$ 를 만족하여야 설계 주파수에서 최대의 전력을 가져다 준다.

계산된 부하 임피던스 $Z_L = 22.79 - j98.626$ 을 50Ω 과 정합이 되도록 개방 스테브를 사용하여 <그림 3.17>과 같이 출력측 정합 회로를 설계하였다. 설계된 출력 정합회로는 <그림 3.18>과 같이 $Z_L = 22.88 - j98.79$ 결과 값을 얻었다.



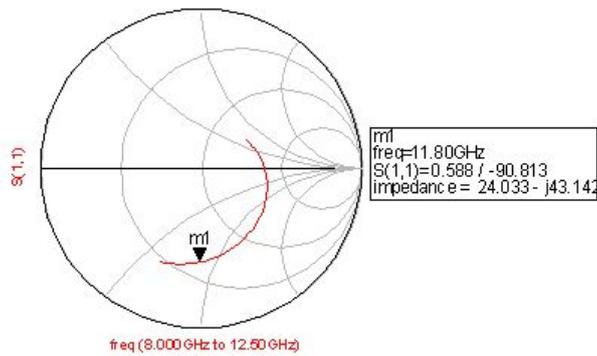
<그림 3.17> 출력측 정합회로



<그림 3.18> 출력측 정합회로 임피던스

설계된 출력 정합회로를 앞에서 설계된 발진기 회로에 연결하여 출력 특성을 확인한 후, 출력 전력을 최대일 때로 최적화 하였다.

<그림 3.19>는 최적화된 최종 출력측 정합회로의 임피던스 $Z_L = 24.033 - j43.14$ 의 값을 갖는다.



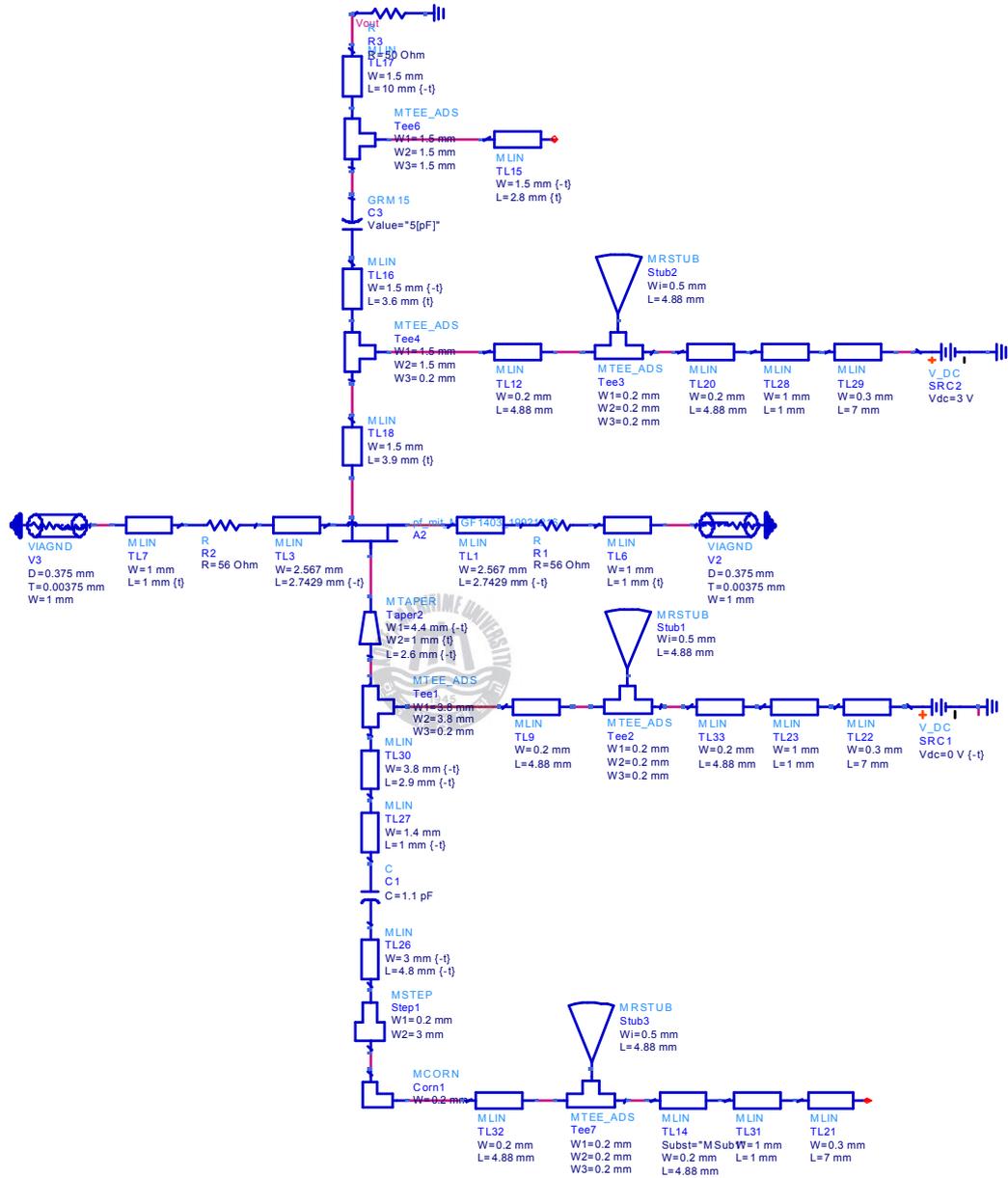
<그림 3.19> 최적화 된 출력측 정합회로 임피던스

3.2.5 최적화된 전압제어 발진기 회로

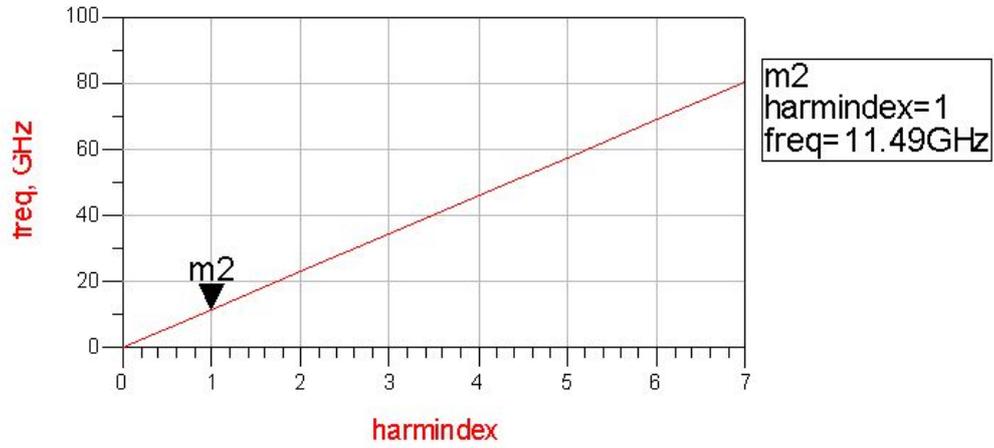
설계된 출력 측 정합회로를 연결 한 후, 출력 전력, 고조파 특성 등 트랜지스터의 비선형 특성에 의해 발생하는 발진 특성 예측을 하기 위하여 ADS를 이용하여 하모닉 발란스 시뮬레이션을 하였다.

ADS를 이용하여 최적화 한 전압 제어 발진기의 최종 회로는 아래 <그림 3.20>와 같다. 설계된 전압 제어 발진기는 <그림 3.21>과 같이 커패시턴스가 1.1pF일때 11.49GHz에서 10.53dBm의 크기를 갖는 신호가 발생되었다. 바랙터 다이오드의 커패시턴스 변화에 따른 주파수 변동 특성을 살펴보기 위해 커패시턴스가 2.5pF일 때 발진 주파수와 신호의 크기를 시뮬레이션을 한 결과 <그림 3.22> 와 같이 발진 주파수 11.21GHz, 신호 크기 11dBm을 얻었다.

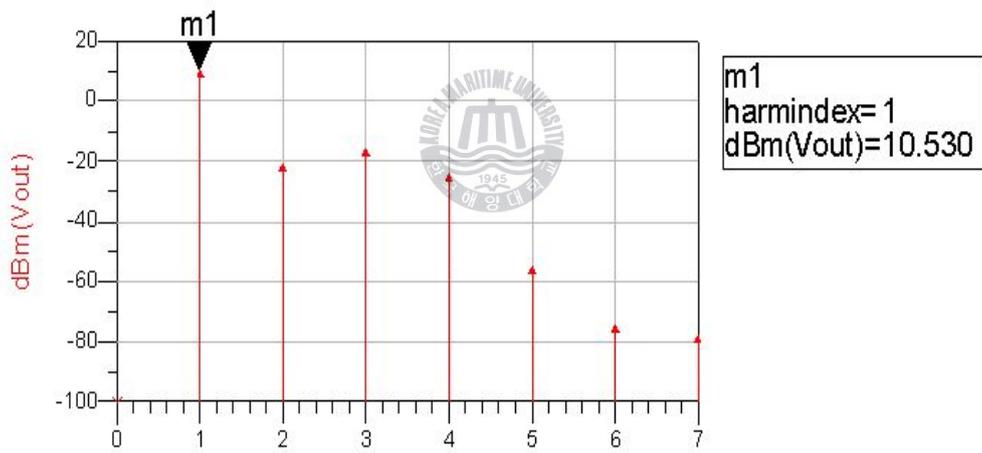




<그림 3.20> 최적화된 전압제어 발진기 회로

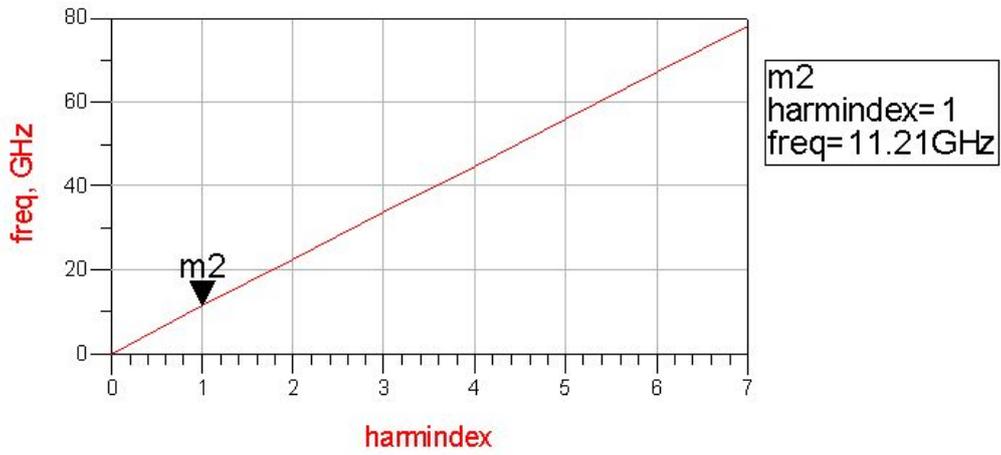


(a) 전압제어 발진기 주파수

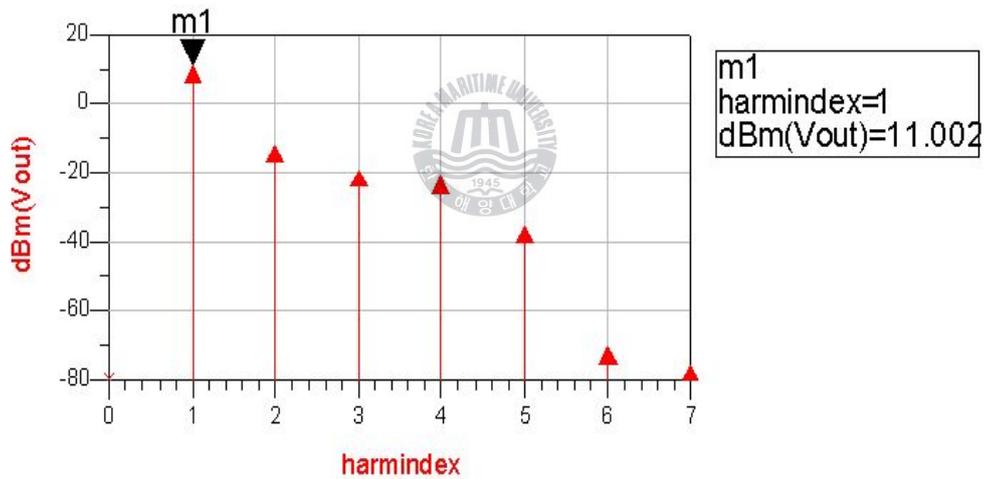


(b) 전압제어 발진기 출력

<그림 3.21> 전압제어 발진기 주파수 및 출력 전력 (C=1.1pF)



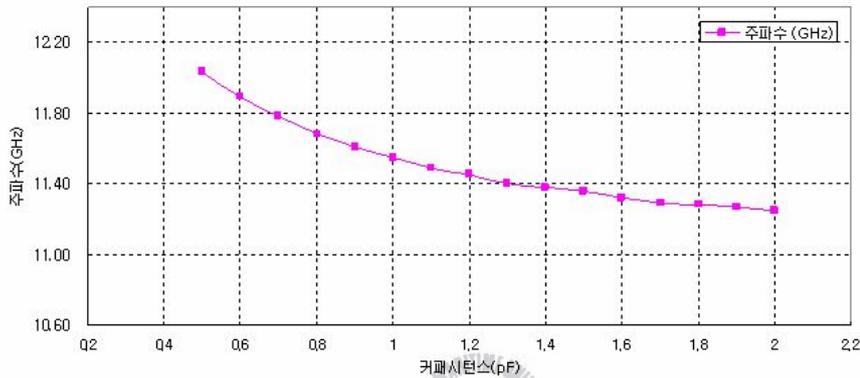
(a) 전압제어 발진기 주파수



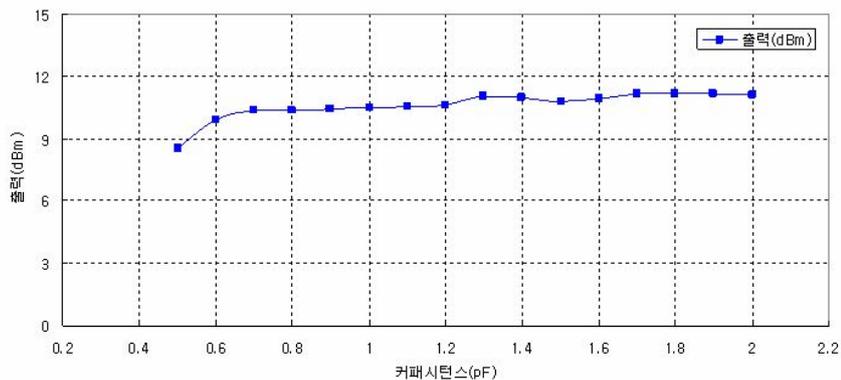
(b) 전압제어 발진기 출력

<그림 3.22> 전압제어 발진기 주파수 및 출력 전력 (C=2.5pF)

ADS 시뮬레이션을 통해 바랙터 다이오드의 커패시턴스에 따른 발진주파수 및 출력 변화는 <그림 3.23>와 같다. 바랙터 다이오드의 커패시턴스가 0.5~2.0pF로 변화할 때 주파수는 11.25~12.03GHz까지 780MHz의 변화 폭을 가지며 출력은 8.54~11.12dBm인 약 2.58dBm의 변화를 보였다.



(a) 바랙터 다이오드의 커패시턴스 변화에 따른 주파수



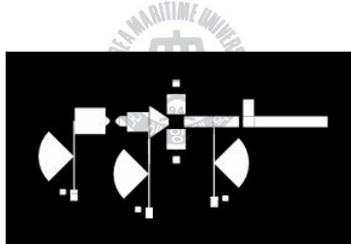
(b) 바랙터 다이오드의 커패시턴스 변화에 따른 출력

< 그림 3.23 > ADS를 이용한 주파수 및 출력 변화

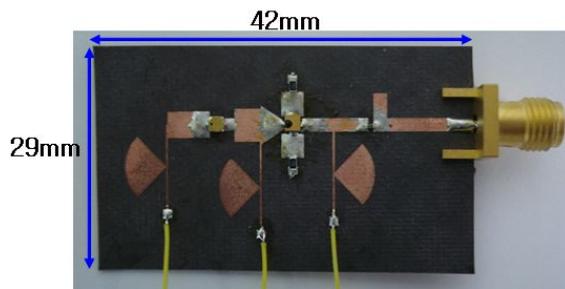
3.3 전압제어 발진기 제작 및 고찰

3.3.1 전압제어 발진기 제작

본 논문에서는 X-밴드 주파수대에서 사용가능한 전압제어 발진기를 설계 및 제작하였다. <그림 3.24>는 설계된 전압 제어 발진기의 레이아웃과 실물사진이다. 제작한 PCB의 크기는 42mm × 29mm이고 기판상의 유전율(ϵ)은 2.33, 높이는 0.508mm인 Rogers사의 RT-duroid 5870 기판을 사용하였다. 전압제어 발진기에 사용된 트랜지스터는 발진용 소자인 MITSUBISHI사의 MGF-1403을 사용하였고, 가변 용량 소자는 MA-COM사의 MA46H201 바랙터 다이오드를 사용하였다.



(a) 전압제어 발진기 레이아웃



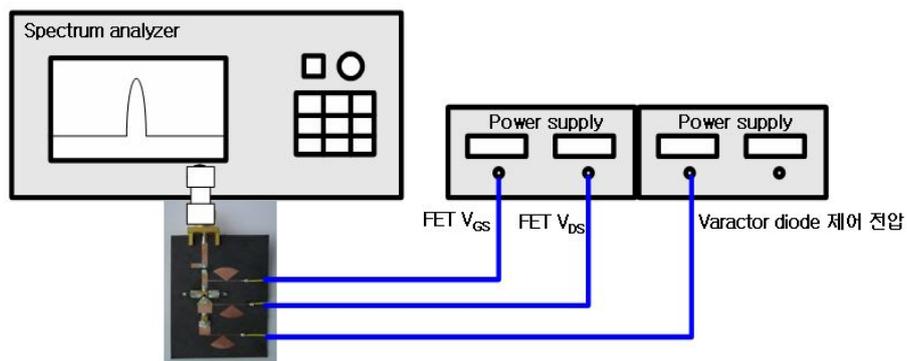
(b) 제작된 전압제어 발진기 사진

<그림 3.24> 제작된 전압제어 발진기 설계 도면과 사진

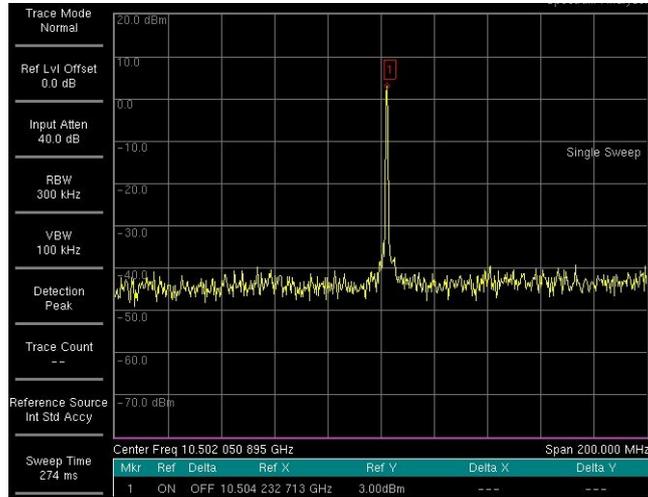
3.3.2 전압제어 발진기 실험결과 및 고찰

제작된 전압제어 발진기의 특성을 측정하기 위해 트랜지스터(FET)의 바이어스는 $V_{DS} = 3V$ 이고, $V_{GS} = 0V$ 를 가하고 바랙터 다이오드 역방향 전압을 1~18V까지 변화하면서 발진 특성을 관찰하였다. 측정에 사용된 장비는 스펙트럼 분석기(Spectrum Analyzer) MS2667C이다. <그림 3.25>은 실험측정 셋업을 나타낸다.

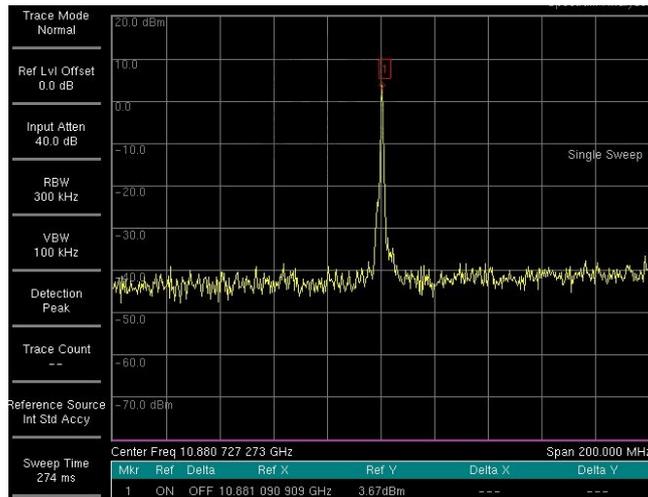
<그림 3.26>은 바랙터 다이오드의 제어전압이 1V 일때와 18V 일때의 출력을 나타낸다. 제어전압이 1V일때는 10.50GHz에서 출력전력이 3.0dBm이었고, 18V일때는 10.88GHz에서 출력전력이 3.67dBm이었다. 제어전압에 따른 주파수 변화를 <그림 3.27>에 나타내었다. 제어전압이 1~18V 까지 변화할 때 발진 주파수는 10.50GHz~10.88GHz 변화하며 380MHz의 대역폭을 가졌고 출력은 3~3.67dBm이 측정되었다. 제작된 전압제어 발진기 측정 시, 스펙트럼 분석기 연결을 위한 커넥터의 손실이 1dBm 정도 였다. 그러므로 회로의 실제 출력 전력은 4~4.67dBm이 된다. <그림 3.28>은 제작된 전압제어 발진기의 주파수와 커넥터의 손실 값을 보상한 출력전력의 변화를 나타낸 그래프 이다.



<그림 3.25> 실험측정 장비 구성

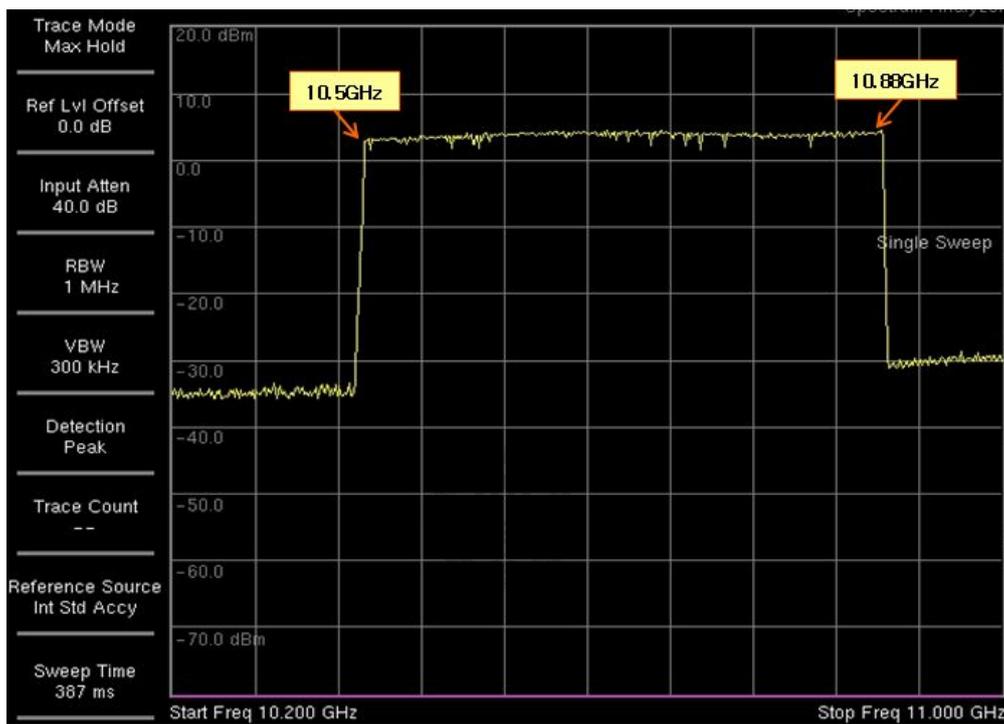


(a) 제어 전압 1V (10.50GHz)

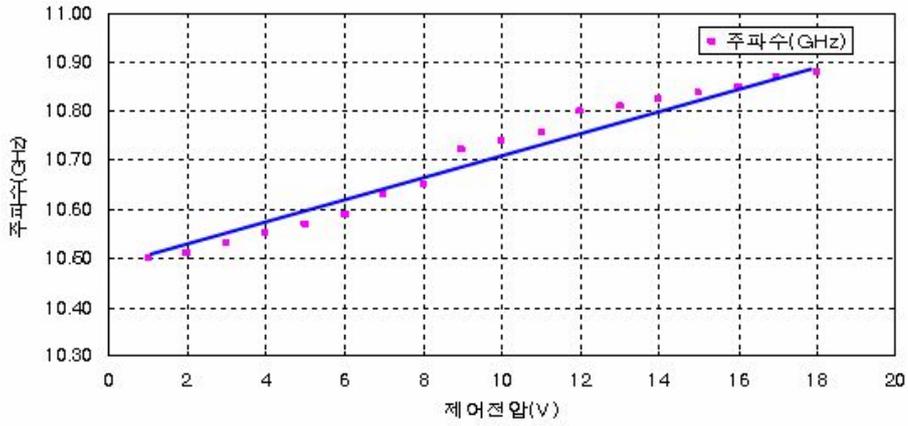


(b) 제어 전압 18V (10.88GHz)

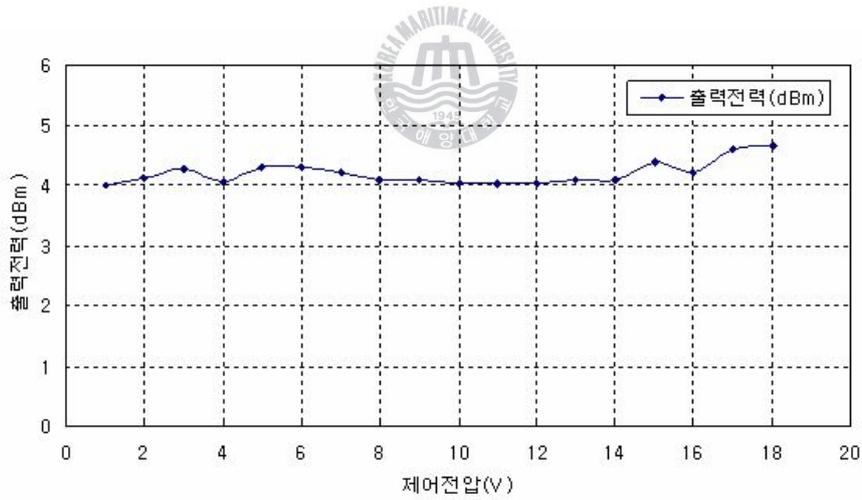
<그림 3.26> 전압제어 발진기 주파수 측정 결과



<그림 3.27> 제어전압에 따른 전압제어 발진기 출력



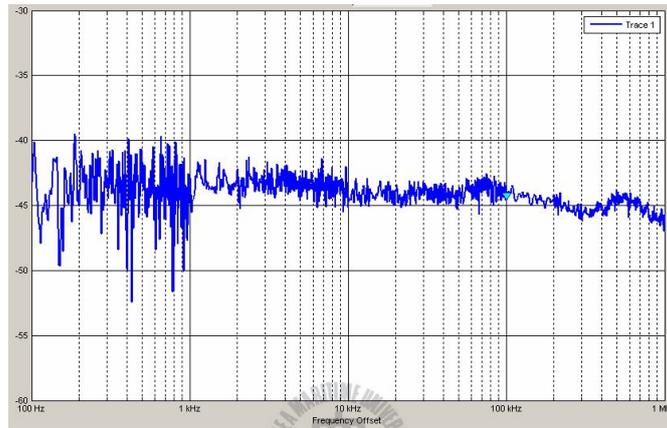
(a) 발진 주파수



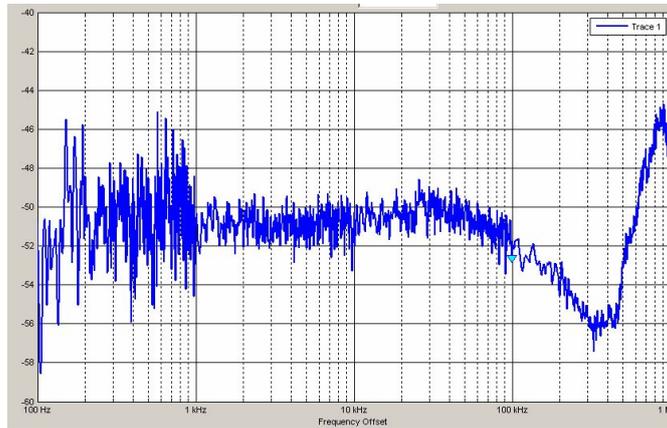
(b) 출력 전력

<그림 3.28> 제어 전압 변화에 따른 발진 주파수 및 출력전력 변화

<그림 3.29>는 발진주파수의 위상잡음의 특성을 나타낸다. 위상잡음이란 중심주파수에서 오프셋 주파수를 100KHz 만큼 떨어진 주파수에서 1Hz의 대역폭을 갖는 잡음전력과 발진주파수에서의 신호 전력비로 정의된다. 제어전압이 1V일 때 -40.5dBc/Hz 와 18V일 때는 -52.4dBc/Hz 로 측정되었다.



(a) 제어 전압 1V

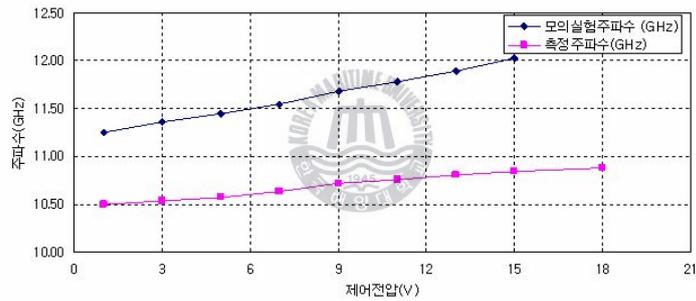


(b) 제어 전압 18V

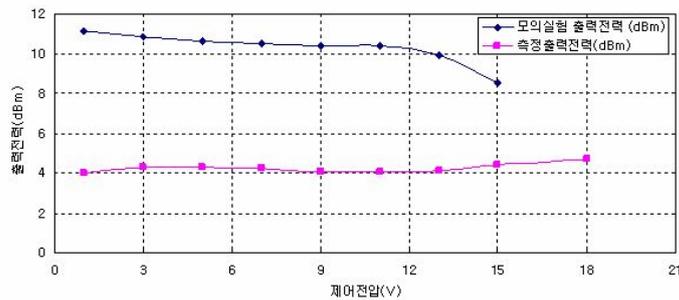
<그림 3.29> 발진시 위상잡음 특성

ADS를 이용한 모의실험 결과와 제작한 전압제어 발진기의 측정결과를 <그림 3.30>에 비교하였다. 모의실험 결과 주파수 조정 범위는 780MHz, 출력 전력은 8~11dBm 이었으나, 제작한 전압제어 발진기는 주파수 조정 범위가 380MHz, 출력 전력은 4~4.67dBm으로 측정되었다.

전압제어 발진기는 전압에 의해 가변 되지만, 온도변화나 전압 불안정과 같은 외부적 영향에 약하다는 문제점이 있어 발진 주파수가 고정되지 않고 흔들리는 특징이 있다. 또한, X-밴드 주파수대를 사용하기 때문에 스트립 라인의 미세한 길이 변화에 대해서도 영향을 크게 받음으로서, 제작상의 오차에 의한 것으로 예상 된다.



(a) 발진 주파수



(b) 출력 전력

<그림 3.30> 전압제어 발진기의 모의실험과 측정치 비교

제작된 전압제어 발진기를 측정한 결과와 목표치를 <표 3.1>에 나타내었다. 주파수 조정 범위는 X-밴드 주파수에서 200MHz 이상의 대역폭을 가지며 동작하도록 목표를 잡았으며, 실제 제작된 전압제어 발진기는 10.50GHz~10.88GHz에서 동작하며 대역폭이 380MHz인 특성을 가졌다. 출력전력은 목표치 5dBm이상에 비해 낮은 출력인 4~4.67dBm인 출력전력을 얻었으며, 위상잡음의 목표는 -60dBc/Hz 였으며 실제 측정치는 1V일때는 43.5dBc/Hz, 18V일때는 -52.4dBc/Hz인 특성을 가졌다.

<표 3.1> 제작된 전압제어 발진기 결과

	목 표	측 정
주파수 조정 범위	X-밴드 주파수 : 200MHz	380MHz (10.5~10.88GHz)
출력 전력	5dBm	4~4.67dBm
위상잡음	-60dBc/Hz	1V : -43.5dBc/Hz 18V : -52.4dBc/Hz

제 4장 결 론

본 논문은 X-밴드 주파수에서 주파수 동작범위는 200MHz 이상의 대역폭을 가지며 출력 전력이 5dBm이상인 전압제어 발진기의 제작에 목표를 두고, 실제 10.50GHz~10.88GHz 에서 동작하고 출력 전력은 4~4.67dBm을 갖는 전압제어 발진기를 설계 및 제작하였다.

구현된 전압제어 발진기는 MITSUBISHI사의 ATF1403 FET와 MA-COM사의 MA46H201 바랙터 다이오드 소자 및 마이크로 스트립 라인을 이용하여 전압제어 발진 회로를 구성하였다. 설계 및 시뮬레이션은 HP사의 ADS를 이용하여 최적화 하였다. 제작용 기판상의 유전율이 2.33 이고 두께가 0.508mm 인 Rogers사의 RT-duroid 5870기판을 사용하였다.

제작된 발진기의 성능은 HP사의 스펙트럼 분석기(MS2667C)를 이용하여 측정하였고 FET의 바이어스로 $V_{DS} = 3V$ 이고, $V_{GS} = 0V$ 를 가하고 바랙터 다이오드의 역방향 가변 전압을 1~18V까지 변화시켰다. 발진주파수범위는 10.50GHz~10.88GHz까지 380MHz이었고 출력 전력의 크기는 4.0dBm~4.67dBm였다. 위상잡음은 $-43.5dBc/Hz$, $-52.4dBc/Hz @100KHz$ 특성을 보였다.

설계·제작된 전압 제어 발진기는 선박의 유량 및 거리 측정이 가능한 X-밴드 레이더 신호원으로서 사용 할 수 있는 가능성을 보였다.

전압제어 발진기의 X-밴드내의 주파수 조정 범위를 넓히기 위한 방안으로 바랙터를 병렬 연결하여 커패시턴스의 변화량을 크게 함으로서 주파수 조정 범위를 넓힐 수 있는 방안을 모색 중이다.

참 고 문 헌

- [1] 최재원, 이종민, 서철현, “Microstrip Square Open Loop와 Tunable Negative Resistance를 이용한 저위상 잡음 전압 제어 발진기,” 한국전자과학회, 제 17권 제12호, pp. 1143~1149, 2006.
- [2] 최재원, 서철현, “Varactor-Loaded Split-Ring(VLSRR) 기반의 가변 Metamaterial 전송 선로를 이용한 광대역 전압제어 발진기,” 전자공학회, 제 44권 제11호, pp. 1136~1141, 2007.
- [3] 최재원, 서종민, 서철현, “Microstrip Square Open Loop와 Tunable Negative Resistance를 이용한 저위상 잡음 전압 제어 발진기,” 한국전자과학회, 제 17권 제12호, pp. 1143~1149, 2006.
- [4] 좌동우, 서철현, “Spiral 공진기를 이용한 저위상 잡음 전압 제어 발진기,” 전자공학회, 제 45권 제2호, pp. 574~577, 2008.
- [5] 최재원, 서철현, “마이크로스트립 사각 개방 루프 SRR를 이용한 저위상 잡음 전압 제어 발진기,” 전자공학회, 제 44권 제12호, pp. 1181~1186, 2007.
- [6] 최재원, 서철현, “고조파 조절 회로를 기반으로 한 출력 정합 회로를 이용한 저위상 잡음 전압 제어 발진기,” 전자공학회, 제 45권 제2호, pp. 256~263, 2008.

[7] 한상철, 오승엽, “근거리 무선통신용 5.5GHz 대역 VCO설계 및 제작,” 한국전자과학회, 제 12권 제13호, pp. 401~408, 2001.

[8] 최재원, 서칠현, “마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기와 가변 부성 저항을 이용한 저위상 잡음 Push-Push 전압제어 발진기,” 한국전자과학회, 제 18권 제8호, pp. 847~853, 2007.

[9] 명성식, 전상훈, 육종관, “InGaP/GaAs HBT를 이용한 WLAN용 Low Noise RFIC VCO,” 한국전자과학회, 제 15권 제2호, pp. 145~149, 2004.

[10] 최재원, 서칠현, “자동크기 조절 회로와 Switched LC tank를 이용한 집적화된 저위상 잡음 다중 대역 0.13- μ m CMOS 전압제어 발진기,” 전자공학회, 제 44권 제1호, pp. 79~84, 2007.

[11] 정용성, 김진수, 변종대, 임재봉, “9.4GHz PLL VCO의 설계에 관한 연구,” 한국전자과학회, 제 16권 제1호, pp. 67~71, 2003.

[12] 박창현, 최병하, “낮은 위상잡음을 갖는 X-band 전압제어 유전체 공진형 발진기의 설계 및 제작,” 전자공학회, 제 41권 제5호, pp. 69~75, 2004.

[13] 성연재, 강연덕, 이택경, “X밴드 광대역 전압조정 발진기의 설계 및 제작,” 전자공학회, 제 42권 제3호, pp. 691~694, 2002.

[14] 이문규, 문성모, 민상보 “바랙터 다이오드를 이용하지 않은 광대역

Push-Push 전압제어 발진기,” 한국전자과학회, 제 16권 제4호, pp. 345~350, 2005.

[15] 김종식, 문연국, 원광호, 신현철 “향상된 전력효율을 갖는 GaInP/GaAs HBT 마이크로파 푸쉬-푸쉬 전압조정 발진기,” 전자공학회, 제 44권 제9호, pp. 821~830, 2007.

[16] Leeson, D.B., A simple model of feedback oscillator noise spectrum:, *Proc IEEE*, pp 329-330, 1996.

[17] 하헌태, “850MHz에서 동작하는 전압조정 발진기의 설계 및 제작”, 한국과학기술원 석사 학위 논문, 1990.

[18] Ulrich L. Rohde, David P, Newkirk, *RF/Microwave Circuit Design for wireless Applications*, Wiley Interscience, 2000.

[19] G. Gonzalez, *Microwave Transistor Amplifiers Analysis and Design*, Prentice-Hall Inc., 1997.

[20] Eric Holzman, *Solid State Microwave Power Oscillator Design*, Artech House, 1992.

[21] Minoru Maeda, Katsuhiko Kimura, Hiroshi Kodaera, "Design and Performance of X-band Oscillator with GaAs Schottky-Gate Field-Effect Transistor," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, vol.

MTT-23, no. 8, pp 661-667, 1975.

[22] W. P. Robins, *Phase noise in signal sources*, Peter Peregrinus Ltd., 1984.

[23] Matthew M. Radmanesh, *Radio Frequency and Microwave Electronics*, Prentice-Hall PTR, 2001.

[24] Behzad Razavi, *RF Microwave Engineering*. Addison-Wesley Publishing Company, 1990.

[25] Reinhold Ludwig, Pavel Bretchko, *RF Circuit Design Theory and Applications*, Prentice-Hall, 2000.



[26] J. K. Hardy, and P. Hardy, *High Frequency Circuit Design*. Reston Virginia Prentice-Hall, 1979.

[28] D. Ham, A. Hajimiri, "Concepts and Methods in Optimization of Integrated LC VCOs," *IEEE Journal of solid-state circuits*. vol. 36, no. 6, pp.896-909, June 2001.