

# 개루프 방법에 의한 확장된 전기적주파수조정범위를 갖는 유전체공진기발전기의 설계 및 제작

## Design and Fabrication of Wide Electrical Tuning Range DRO Using Open-Loop Method

정해창 · 오현석 · 양승식 · 염경환

Hae-Chang Jeong · Hyun-Seok Oh · Seong-Sik Yang · Kyung-Whan Yeom

### 요 약

본 논문에서는 개루프 설계 방법을 이용하여, 전기적주파수조정범위가 확장된 전압제어유전체공진기발전기(Vt-DRO: Voltage-tuned Dielectric Resonator Oscillator)를 설계하였다. 설계된 전압제어유전체공진기발전기는 공진부, 증폭부, 위상천이부로 구성하였다. 발진조건을 만족하기 위하여, 각 부에서의 크기와 위상을 결정하였다. 각 부를 연결하여 측정된 S-파라미터는 개루프 발진조건을 만족하였다. 또한, 측정된 개루프의 군지연(group delay)로부터 전기적주파수조정범위(electrical frequency tuning-range)를 수식으로 도출하였다. 이와 같이 설계된 개루프의 입력력을 연결하고 폐루프로 구성하여 전압제어유전체공진기발전기를 구현하였다. 그 결과, 0~10 V의 조정전압으로 중심주파수 5.3 GHz에서 전기적주파수조정범위는 수식으로 도출한 값과 근사한 82 MHz를 얻었고, 이는 선형적인 변화를 보였다. 이 때, 위상잡음은 100 kHz offset에서  $-104 \pm 1$  dBc/Hz, 출력전력은  $5.86 \pm 1$  dBm로 평탄함을 보였다.

### Abstract

In this paper, we presented a Vt-DRO with a wide electrical frequency tuning range, using open-loop gain method. The Vt-DRO was composed of 3-stages, resonator, amplifier and phase shifter. In order to satisfy an oscillation condition, we determined magnitude and phase of each stage. The measured S-parameter of cascaded 3-stages shows open-loop oscillation condition. Also, using measured open loop group delay, we derived the relation for electrical frequency tuning range. The Vt-DRO was implemented by connecting the input and the output of the designed open-loop and resulted in closed-loop. As a results, tuning-range of Vt-DRO is 82 MHz, which is close to the predicted results for tuning voltage 0~10 V and shows linear frequency tuning at the center frequency of 5.3 GHz. The phase noise is  $-104 \pm 1$  dBc/Hz at 100 kHz offset frequency and power is  $5.86 \pm 1$  dBm respectively.

Key words : Vt-DRO, Open-Loop S-parameter, Wide Electrical Frequency Tuning Range

### I. 서 론

1939년, 유전체공진기가 소개된 이래, 유전체공진기의 공진주파수와 모드의 해석 및 재료의 연구가

진행되었다. 유전체공진기는 저가, 소형, 경량, 높은 품질계수와 높은 주파수 안정도의 이점을 제공하여 여파기와 발전기에 주로 적용되었다<sup>[1]</sup>.

유전체공진기를 적용한 발전기는 낮은 위상잡음

「이 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2009-0063839).」  
충남대학교 전파공학과(Department of Radio Science and Engineering, Chungnam National University)

· 논문 번호 : 200-

· 수정완료일자 : 2009년 월 일

특성의 요구에 맞추어 연구 개발되었고, 4 GHz 이상의 고주파에서 위상잡음 특성이 가장 우수하다. 그러나 낮은 범위의 주파수 흔들림은 통신 시스템에 직접 국부발진기로 적용이 어려워, 보다 안정한 발진기에 위상잡음시켜 국부발진기로 사용한다<sup>[2]~[4]</sup>.

발진기의 설계 방법은 임피던스 방법과 개루프 방법이 있다. 개루프 방법은 루프이득을 이용하여 설계하는데, 낮은 주파수에서는 이러한 루프이득은 용이하게 계산되지만, 높은 주파수에서는 루프이득의 계산이 명확하지 않아, 개루프 방법은 보통 낮은 주파수의 발진기 설계에 국한되었다. 따라서 주파수 조정범위의 시행착오적인 설계에도 불구하고, 높은 주파수의 유전체공진기발진기는 주로 임피던스 방법으로 설계되어왔다<sup>[3]</sup>.

임피던스 방법으로 설계된 유전체공진기발진기는 주파수 조정을 위하여 유전체공진기에 직접 버렉터다이오드가 결합되는 전기적 조정 방법과 조정 나사를 이용한 기계적 조정 방법을 사용한다. 그러나 전기적 조정 방법은 주파수조정범위가 수 MHz로 작고 전기적 조정전압에 따라 공진기의 품질계수가 불균일하게 나타난다<sup>[5]</sup>. 또한 유전체공진기발진기를 위상잡음 회로에 사용할 경우, 앞서 언급한 좁은 전기적주파수조정범위 때문에, 위상잡음이 어려워 기계적 조정에 의해 발진주파수를 위상잡음 주파수 근처까지 옮기는 불편함을 초래한다<sup>[4]</sup>.

최근 발진기의 개루프 설계 방법은 M. Randall과 T. Hock에 의해 측정이 용이한 S-파라미터를 이용하여, 고주파에서도 설계가 가능하도록 제안되었다<sup>[6],[7]</sup>. 발진주파수는 개루프의 위상에 따라 결정되기 때문에, 위상천이기를 삽입하면 발진조건 만족 및 주파수 조정을 쉽게 알 수 있다. 이 때, 위상천이기는 루프의 위상 변화에만 기여하기 때문에 공진기의 품질계수의 손상 없이 주파수 조정이 가능하게 한다<sup>[8]</sup>. 따라서 이 방법은 이후 유전체공진기발진기의 설계에 많이 사용되었다<sup>[8]~[10]</sup>. 그러나 설계된 대부분의 발진기는 위상잡음의 개선에 주력했고, 여전히 전기적주파수조정범위가 좁고, 개선된 바는 없다.

따라서 본 논문에서는 개루프 방법을 이용하여 기계적 주파수 조정이 없이 유전체공진기의 품질계수를 손상시키지 않은 상태로 전기적주파수조정범위를 수십 MHz로 확장하는 방법과 이것의 명확한

예측 방법을 소개하였다. 또한 페루프 형태의 발진기는 그 구성 요소로 공진부, 증폭부와 위상천이부로 이루어지는데, 이는 개별 분리가 가능하며, 설계 목표를 만족하는 각 부분들의 설계 사양을 쉽게 도출할 수 있고, 이를 이용한 설계 방법을 제안하였다. 또한, 이와 같은 방법으로 설계된 전압제어유전체공진기발진기를 제작 및 측정하고, 이를 설계치와 비교하여 설계 과정의 타당함을 검증하였다.

## II. 발진기 설계 이론

### 2-1 발진조건

그림 1에 공진부, 증폭부와 위상천이부로 이루어진 발진기의 구조를 보였다. 여기서 출력은 커플러를 통해 얻게 된다. 이 때, 위상천이부는 발진주파수 조정을 위하여 삽입된 것이다. 그림의 점선과 같이 페루프를 절단하여 개루프에 대한 S-파라미터 측정을 할 경우, 이 측정된 S-파라미터로부터 루프이득(loop gain)  $L(\omega)$ 을 계산할 수 있다<sup>[6]</sup>.

이 때, 루프이득  $L(\omega)$ 는 S-파라미터로 식 (1)과 같이 표시된다.

$$L(\omega) = \frac{S_{21} - S_{12}}{1 - S_{11}S_{22} + S_{21}S_{12} - 2S_{21}} \quad (1)$$

여기서, 식 (1)은  $S_{11}$ ,  $S_{22}$ ,  $S_{12}$ 이 작을 때, 다음과 같이 간략화 된다.

$$L(\omega) \cong S_{21} \quad (2)$$

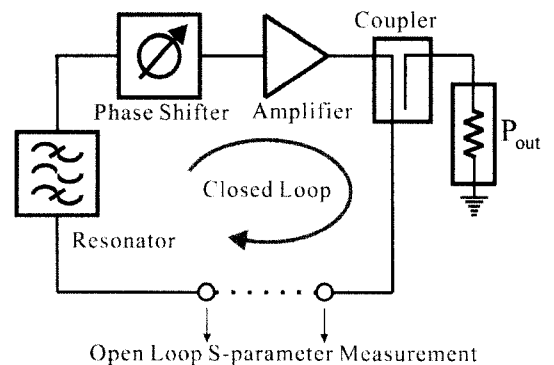


그림 1. 페루프 전압제어발진기 구조  
Fig. 1. Structure of closed-loop voltage controlled oscillator.

식 (2)로부터 발진조건은 다음과 같이 정해진다.

$$dB(S_{21}) \geq 0 \quad (3)$$

$$phase(S_{21}) = 2n\pi \quad (n=0, 1, 2, \dots) \quad (4)$$

따라서, 개루프 방법을 사용할 경우, 증폭기, 위상 천이기와 공진기를 순차적으로 연결하여 개루프 상태에서 S-파라미터 측정 후, 발진주파수에서 식 (3), 식 (4)를 만족한다면, 페루프 형성을 통하여 간단히 원하는 주파수에서 발진기를 구성할 수 있다.

발진주파수는 S<sub>21</sub>의 위상이 0이 되는 곳에서 나타나기 때문에, 위상천이기를 이용하여 위상을 조정하게 되면, 발진주파수를 조정할 수 있다.

### 2-2 전기적주파수조정범위와 군지연

그림 2에 앞서 얻은 루프 이득의 개략적인 크기와 위상의 형상을 보였다.

여기서 ±θ의 위상변이를 갖는 위상천이기가 사용된다면, 이 위상천이기에 의하여 그림 2에서 대응하는 주파수 f<sub>1</sub> 및 f<sub>2</sub>까지 발진주파수가 조정됨을 알 수 있다. 따라서 전기적주파수조정범위는 Δf=f<sub>2</sub>-f<sub>1</sub>으로 얻어진다.

S<sub>21</sub>의 위상 변화는 식 (5)에 따라 정의되는 군지연(t<sub>d</sub>)을 이용하여 나타낼 수 있다. 또한, 이 때, 이 군지연은 식 (6)과 같이 각 부의 개별 군지연의 합이 된다.

$$t_d = -\frac{\partial \Phi}{\partial \omega} = -\frac{1}{360} \frac{\partial \theta}{\partial f} \quad (5)$$

$$t_d = t_{d(Resonator)} + t_{d(Amplifier)} + t_{d(Phase Shifter)} \quad (6)$$

따라서, 전기적주파수조정범위는 군지연을 이용하여 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 θ는 deg로 나타냈다.

$$\Delta f = \frac{1}{180} \frac{\theta}{t_d} \quad (7)$$

또한 L(ω)의 품질계수(Q)는 식 (8)과 같이 군지연으로 표현할 수 있다.

$$Q = \pi f_0 t_d \quad (8)$$

이와 같이 Q가 구해질 경우 페루프를 형성하였을 때 얻어지는 위상잡음은 Leeson에 의하여 식 (9)와

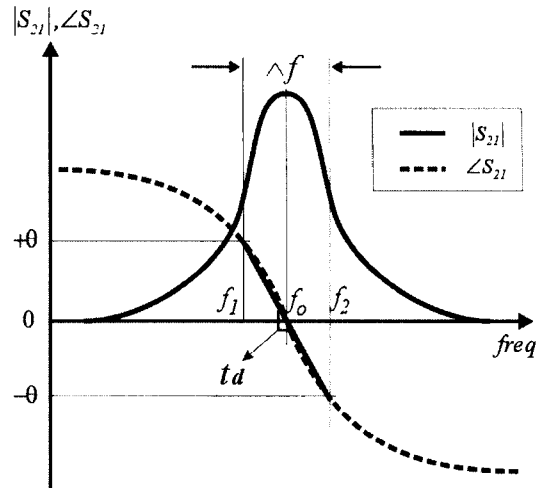


그림 2. 전체 개루프 S-파라미터 특성  
Fig. 2. Total open-loop S-parameter characteristic.

같이 나타낼 수 있다.

$$S(f_m) = -10 \log \left\{ \frac{1}{2} \frac{FkT}{P} \left[ 1 + \left( \frac{1}{f_m} \frac{f_0}{2Q} \right)^2 \right] \right\} \quad (9)$$

여기서 f<sub>m</sub>은 offset frequency를 나타내며, P 및 F는 발진 출력 및 증폭부의 잡음지수를 나타낸다. 발진기의 주요 성능지표로 위상잡음과 주파수조정범위가 있다. 위상잡음은 Leeson의 식으로부터 Q가 커지면 감소하게 된다<sup>[11],[12]</sup>. 전기적주파수조정범위와 군지연은 반비례 관계에 있으므로, 식 (7)과 식 (9)로부터, 군지연에 따라 전기적주파수조정범위와 위상잡음은 trade off가 성립됨을 알 수 있다.

주목할 것은, 앞서 루프이득의 군지연은 Q가 큰 유전체공진기에 의한 기여가 가장 우세하여, 공진부의 특성으로 위상잡음, 전기적주파수조정범위가 결정된다. 따라서 공진부는 발진기 설계 목표를 만족하는 군지연을 갖도록 설계하는 것이 필요하다.

이와 같이 군지연이 정해졌을 경우, 위상천이부는 설정된 주파수조정범위를 만족하기 위한 위상천이량을 가지도록 하면 된다.

그리고 증폭부는 루프의 이득을 0 dB 이상으로, 식 (3)의 발진조건을 무조건 만족하도록 충분히 큰 이득을 갖도록 하여야 할 것이다.

이와 같이 측정이 용이한 S-파라미터를 이용하여 발진기의 설계 목표와 발진조건을 만족하는 발진기의 구성 요소들인 공진부, 증폭부와 위상천이부의

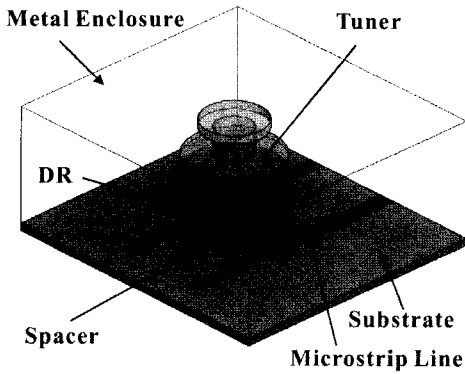


그림 3. 공진단 구조  
Fig. 3. Structure of resonator.

사양을 결정할 수 있다.

### III. 발진기 설계 과정

#### 3-1 공진부

본 논문에서는  $Q$ 가 큰 유전체공진기를 사용하여 공진부를 구성하였다. 선택한 유전체공진기는 Murata사의 DRD107UC048( $\epsilon_r=37.7$ ,  $Q_{unloaded}=6,800$  @ 7 GHz)로 공진주파수는 4.96~5.40 GHz이다<sup>[13]</sup>. 직렬 공진 특성을 갖기 위하여 그림 3과 같이 구성하고, Ansoft사의 HFSS<sup>TM</sup>을 이용하여 해석한 후 측정하였다. 이 때 기판은 RT/Duroid 4350( $\epsilon_r=3.66$ ,  $H=30$  mil)<sup>[14]</sup>를, 도체 상자의 천정에 고정된 조정 나사(tuner)와 유전체공진기 사이 간격은 3.6 mm이고, spacer는 지름 6 mm, 높이 0.6 mm를 사용하였다.

Spacer는 유전체공진기에 여기되는 자계를 수직으로 통과시켜 기생 공진을 없애기 위하여 사용한다. 보통 spacer의 유전율이 유전체공진기의 유전율에 비해 작기 때문에 spacer 높이가 주요 변수로 공진연과 공진주파수가 변화한다. 이 때, 공진주파수는 tuner를 사용하면 100 MHz의 적은 범위 내에서 공진연의 영향이 없는 조정을 보장할 수 있다. 따라서 공진주파수를 고정시킨 가운데, spacer와 tuner의 높이로 공진연의 조정이 어느 정도 가능하다. 또한, 유전체공진기는 외부의 영향이 없도록 하고, 공진주파수에서의 삽입손실이 작아지도록 금속 차폐하였다.

그림 4에 시뮬레이션 된 유전체공진기의  $S$ -파라미터 특성과 측정된  $S$ -파라미터를 보였다. 두 결과는

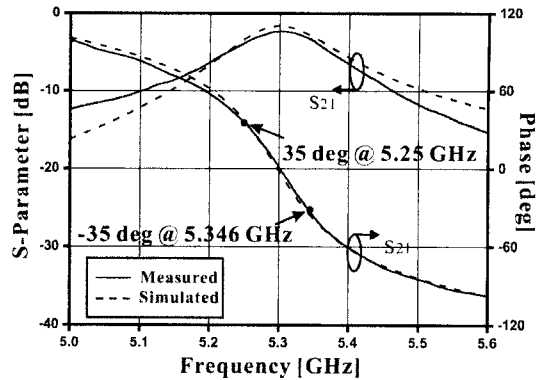


그림 4. 측정된 유전체공진기  $S$ -파라미터 특성  
Fig. 4. The measured  $S$ -parameter of dielectric resonator.

매우 근접함을 알 수 있다. 그림 4에서 균지연을 도출할 수 있고, 그 값은 시뮬레이션된 값과 같은 2.3 nsec로 측정되었다. 또한, 공진주파수는 5.3 GHz이고, 위상 특성으로부터 위상천이기가  $\pm 35^\circ$ 의 위상 변화를 보인다면, 식 (7)로부터 약 84.5 MHz의 주파수 조정을 얻을 수 있을 것으로 예상된다. 그리고 50  $\Omega$  부하 상태에서  $Q_{loaded}$ 는 식 (8)에 의하여 36.6으로 계산되어진다.

#### 3-2 위상천이부

위상천이기는 loaded line 구조와 hybrid coupled 구조가 주로 사용된다. Loaded line 구조는 위상천이량이  $45^\circ$  이하로 작고, 삽입 손실의 변동이 크다는 단점을 가진다. Hybrid coupled 구조는 위상천이량은 크고, 삽입손실의 변동이 작지만, 크기가 큰 단점이 있다<sup>[8],[10]</sup>.

본 논문에서는 비교적 그 크기가 작고 삽입손실의 변동이 작은 All Pass Network 위상천이기 구조를 적용하였다<sup>[15]</sup>. 이를 그림 5에 도시하였다. 그림 5에서 가변 인덕터  $L$ 은 버랙터다이오드를 사용하여 구현하였고, 사용주파수 5.3 GHz는 버랙터다이오드의 자기공진주파수(self resonance frequency)보다 높아 버랙터다이오드는 가변 인덕터 특성을 보이게 된다. 가변 인덕터 값에 만족하는 버랙터다이오드로 Skyworks사의 SMV1245를 선택하였다<sup>[16]</sup>. 커패시터  $C_1$  및  $C_2$ 는 칩 커패시터로  $C_1=0.3$  pF,  $C_2=1.2$  pF의 값을 설정하였고,  $C_6$ 는 DC 블록용 커패시터이다. 커

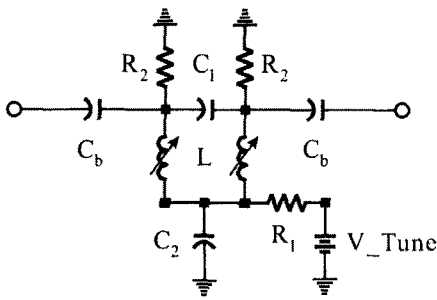


그림 5. All-pass-network 위상천이기 구조  
Fig. 5. Structure of all-pass-network phase shifter.

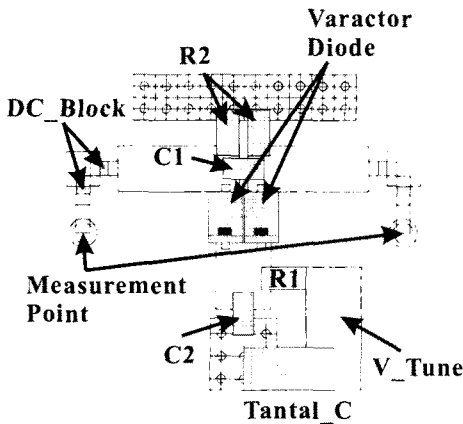


그림 6. 위상천이부의 layout  
Fig. 6. Layout of phase shifter.

패시터들은 높은 자기공진주파수를 갖는 ATC사의 고주파용 커패시터<sup>[17]</sup>를 사용하였다.  $R_1$ 과  $R_2$ 는 벡터 다이오드를 DC 바이어스 하기 위하여 사용하였다. 또 그 값이 커서 RF(Radio Frequency)적으로 영향이 없게 된다. 이들의 초기 값은 문헌<sup>[15]</sup>에 따라 결정하였고, Agilent사의 ADS(Advanced Design System)을 사용하여 원하는 위상천이량을 보이도록 조정하였다.

그림 6은 설계된 위상천이기의 layout이다. 벡터 다이오드와  $R_1$ ,  $C_2$ 의 납땀을 위한 전송선 길이의 추가로,  $C_2$ 의 값은 기존의 1.2 pF에서 0.4 pF로 변경되었다.

그림 7은 설계된 위상천이기의 S-파라미터 측정 결과로 0~10 V의 전압 가변시 삽입손실은 -1.3~-2 dB로 그 변화가 작으며, 5.3 GHz의 중심주파수에서, 71.4°(19.4°~90.8°) 위상 변화량을 갖는다. 그리고 이 값은 원하는 위상천이량과 근접한 결과이다.

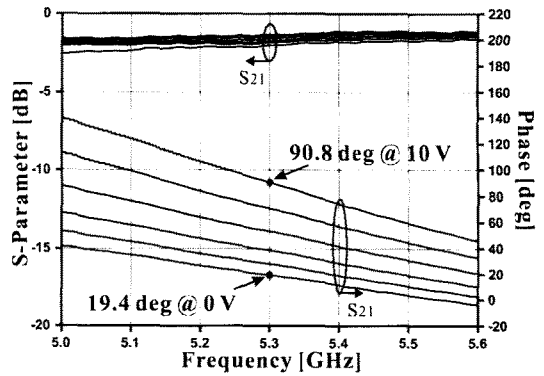


그림 7. 측정된 위상천이기의 S-파라미터  
Fig. 7. The measured S-parameter of phase shifter.

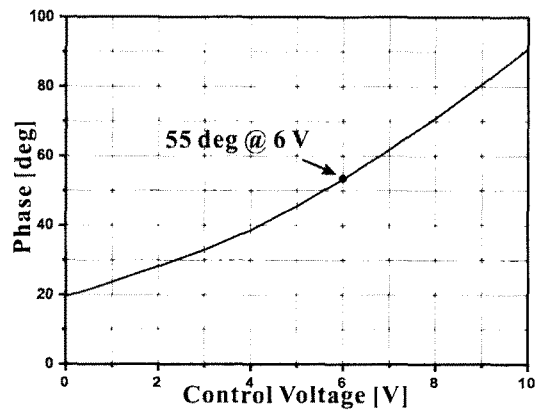


그림 8. 위상천이기의 위상조정특성  
Fig. 8. Phase tuning of phase shifter.

그림 8은 주파수 5.3 GHz에서 조정전압에 따른 위상조정특성을 보였다. 측정된 위상천이기는 약 7°/V의 조정상수를 갖는다.

발전기 설계시 루프를 구성하는 부품, 즉, 증폭기 위상천이기, 공진기의 위상의 합은 360°의 정수배가 되어야 하는데, 이를 위해 별도의 고정된 위상을 갖는 전송선을 삽입한다고 가정하면, 위상천이기는 기준 위상이 55°를 갖는 것을 알 수 있다. 즉, 그림 8에서 조정전압 6 V를 기준으로 변화량이 대칭이 되는 것을 알 수 있다.

### 3-3 증폭부

증폭부는 Hittite사의 GaAs InGaP HBT MMIC로 제작된 HMC313을 사용하여 설계하였다<sup>[18]</sup>. 이 증폭기의 S-파라미터는 자료에서 제공되고 있으나, 이것을 사용할 때, 추가되는 납땀 패턴과 추가되는 마이

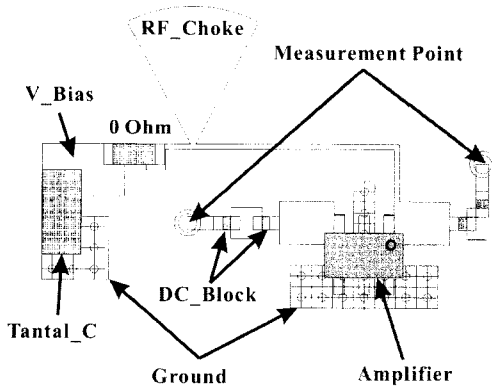


그림 9. 증폭부의 layout  
Fig. 9. Layout of amplifier.

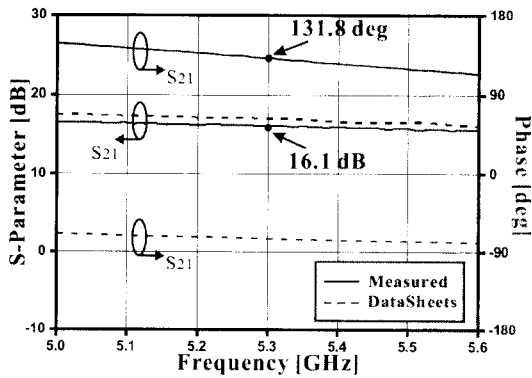


그림 10. 측정된 증폭기의 S-파라미터  
Fig. 10. The measured S-parameter of amplifier.

크로스트립선로 길이로 인해, 증폭부의 크기 특성은 자료와 유사하나, 위상 특성은 자료에서 주어진 값과 다른 값이 나타나게 된다. 이러한 위상 특성 차이는 EM시뮬레이션으로 결정하기 어려워서, 발전기에 사용되는 패턴을 이용하여 실험을 통하여 결정하였다. 그림 9는 증폭부의 패턴을 보여주고 있다. 그리고 그림 10은 측정된 이득과 위상을 보여준다.

그림 10에서, 선정된 증폭기는 5 V, 47 mA의 바이어스를 인가하였을 때, 설계 대역에서 16.1 dB의 이득과 131.8°의 위상을 갖는 것을 알 수 있다. HMC313의 자료를 보면, 크기와 위상은 각각 17 dB, -75°였다. 측정된 증폭부가 이와 같이 차이를 보이는 것은 부정합과, 자료와 다른 측정 환경으로 추측된다. 그러나 증폭부의 이득은 공진부, 위상천이부, 출력부가 갖는 삽입 손실을 보상하기에 충분히 큰 것을 알 수 있다.

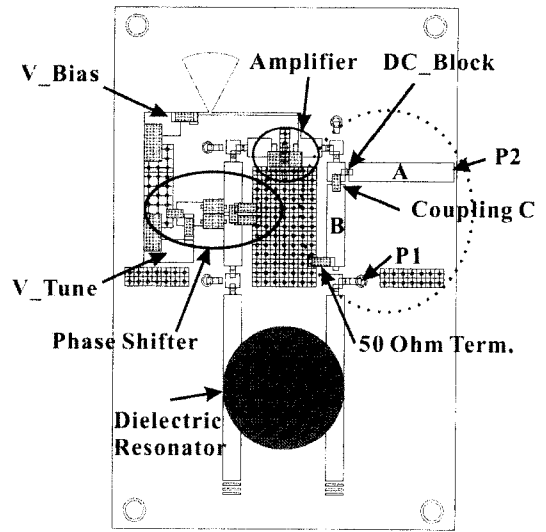


그림 11. 개루프 S-파라미터 측정을 위한 layout  
Fig. 11. Layout for measurement of open-loop S-parameter.

## IV. 제작 및 측정 결과

### 4-1 전압제어유전체공진기발전기 제작

앞서서 측정된 각 부를 포함한 발전기의 layout을 그림 11에 보였다. 중심주파수 5.3 GHz에서 위상 합이 360°의 정수배가 되도록, 그림 11에 보인 바와 같이 전송선을 삽입하였다. 그림 11에서 증폭부, 위상천이부와 공진부를 측정으로 확인하기 위하여, 각 부가 격리되어 있고, DC-블록을 이용하여 납땀을 통하여 연결되게 된다. 100 nF의 고주파용 DC-블록 커패시터를 이용, 연결 유무에 따라 개별 측정 및 전체 측정이 가능하도록 구성하였다. 또한 0.2 pF의 작은 커패시터를 연결하여 발전 파형을 출력하도록 하였다.

각 부의 측정은 그림 12와 같이 뒷면에 커넥터를 부착하여 측정하게 되어 있다. 또한, 전체 루프이득을 측정하기 위하여, 동일한 길이를 갖는 전송선을 삽입하였다. 전송선 A와 전송선 B는 같은 길이를 갖도록 layout되어 있다. 전체 루프이득 측정시에는 전송선 A가 활용이 되게 되며, 끝이 50 Ω으로 종단(termination)된 전송선 B는 출력 포트 역할을 하게 된다. 따라서 P<sub>1</sub> 및 P<sub>2</sub> 사이의 루프 이득을 측정할 경우, 출력 커플링을 포함한, 전체 루프 이득과 같은 결

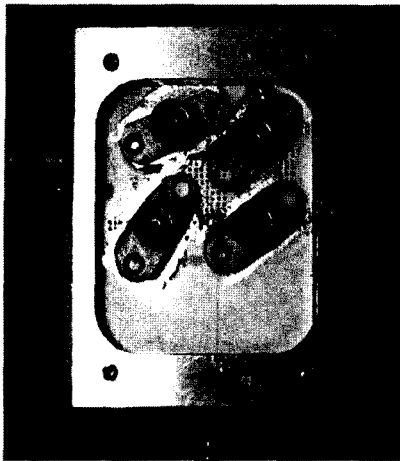


그림 12. 기판의 아랫면  
Fig. 12. The bottom side of board.

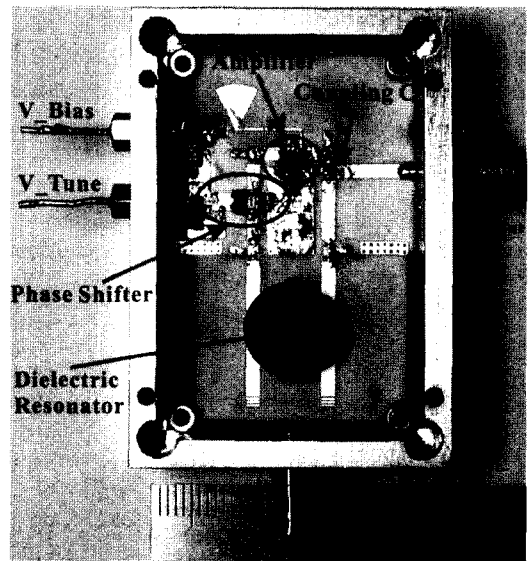


그림 14. 제작된 Vt-DRO(36×51×20 mm<sup>3</sup>)  
Fig. 14. Fabricated Vt-DRO(36×51×20 mm<sup>3</sup>).

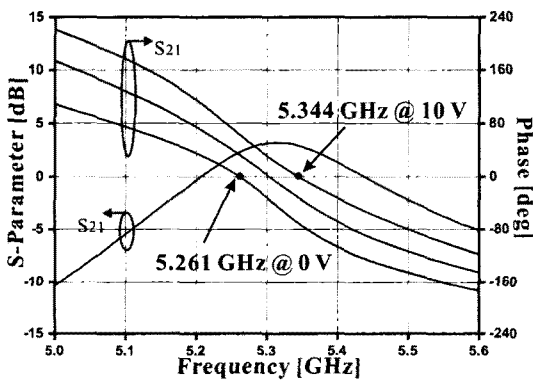


그림 13. 측정된 전체 개루프 S-파라미터  
Fig. 13. The measured total open-loop S-parameter.

과를 주게 된다.

그림 13에 Agilent사의 E8358A 회로망 분석기를 사용하여 측정한 전압제어유전체공진기발진기의 전체 개루프 S-파라미터를 도시하였다. 5.3 GHz 중심 주파수에서  $S_{21}$ 의 크기가 0 dB 이상이고, 위상이 0°이므로 발진조건이 성립한다. 전기적주파수조정범위는 앞서 예상했던 88.4 MHz보다 3.9 MHz가 줄어든 84.5 MHz를 보였다. 이는 증폭단과 위상천이단, 루프의 위상을 맞추기 위한 라인의 군지연이 추가된 것으로 사료된다.

그림 14에 이와 같이 개루프 측정이 끝난 뒤, 조립된 전압제어유전체공진기발진기의 사진을 보였다. 제작된 전압제어유전체공진기발진기의 크기는 가로, 세로, 높이가 각각 36 mm, 51 mm, 20 mm이다.

#### 4-2 페루프 측정 결과

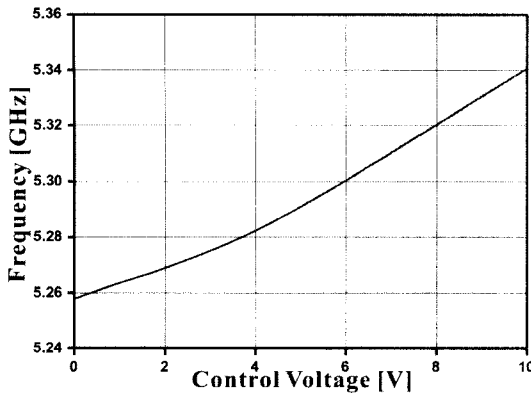
전압제어유전체공진기발진기의 페루프는 그림 11에 보인 개루프 측정 layout에서 출력부의 결합 커패시터(coupling C)와 DC 블록 커패시터의 위치가 서로 바뀌게 되고, 50 Ω 종단은 제거되며, 포트 1( $P_1$ )에 연결되었던 DC 블록 커패시터는 공진부에 연결하고, 포트 2( $P_2$ )는 출력 포트로 연결함으로써 구성된다.

구성된 페루프는 Agilent사의 E5052A 신호원분석기를 사용하여 측정하였고, 그 결과를 그림 15에 도시하였다.

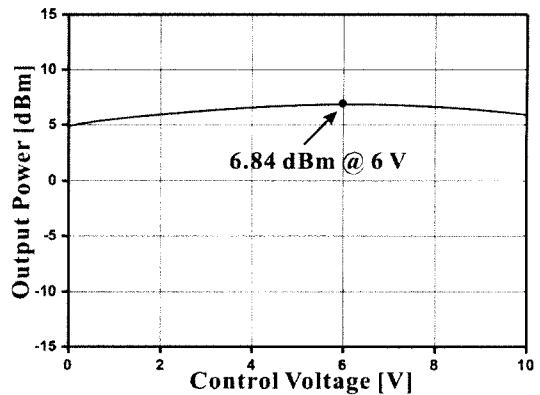
그림 15(a)는 조정전압에 따른 발진주파수를 나타낸다. 0~10 V의 조정전압에서 주파수 조정 범위는 82 MHz(5.258~5.340 GHz)로 측정되었다. 개루프의 군지연으로부터 예상한 84.5 MHz와 측정값이 근사함을 알 수 있다. 2.5 MHz의 차이가 있는데, 이는 위상천이기의 조정전압이 커질 때마다 군지연이 조금씩 커지는 원인 때문으로 사료된다.

그림 15(a)에서 조정전압에 따라 주파수 변화는 상당히 선형적인 것을 알 수 있다. 다소 비선형적인 것은 위상천이기의 조정전압에 따른 위상 변화가 약간의 비선형성을 보이기 때문이다. 그리고 이 특성은 위상천이기의 위상 변화 특성과 거의 일치함을

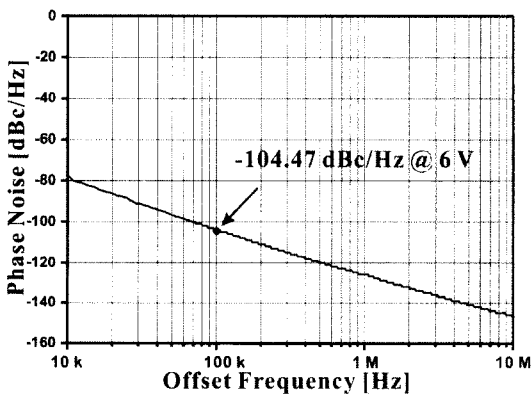
개루프 방법에 의한 확장된 전기적주파수조정범위를 갖는 유전체공진기발전기의 설계 및 제작



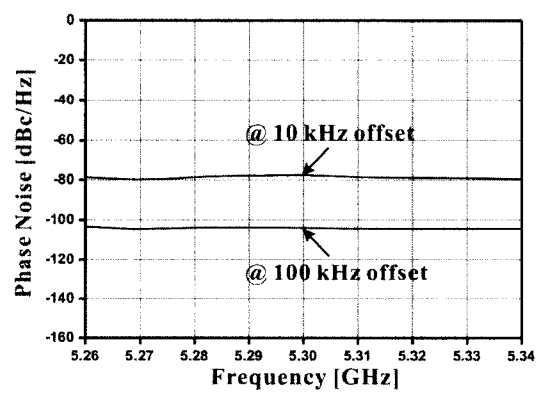
(a) 주파수 조정 특성  
(a) Frequency tuning characteristic



(b) 출력전력 특성  
(b) Output power characteristic



(c) 가변전압 6 V에서의 위상잡음  
(c) Phase noise at 6 V tuning voltage



(d)  $\Delta f$ 에서의 위상잡음 특성  
(d) Phase noise characteristics at  $\Delta f$

그림 15. Vt-DRO의 측정 결과  
Fig. 15. The measured Vt-DRO.

표 1. 본 연구와 상용 제품의 성능 비교

Table 1. Comparison between this work and market products.

제품(모델명)	중심주파수 [GHz]	전기적주파수 조정범위[MHz]	위상잡음 (100 kHz offset)[dBc/Hz]	위상잡음 -104 dBc/Hz로 변환 시 조정 범위[MHz]
본 연구	5.3	82	-104	82
Wave Tronics사(DRO0408) <sup>[19]</sup>	5.43	10	-110	19.95
LUCIX사(LO-855-F2B) <sup>[20]</sup>	5.52	1.88	-122	14.9

알 수 있다. 따라서 위상천이기의 위상 변화 특성이 선형적이라면, 선형성이 좋은 전압제어발전기를 얻을 수 있을 것이다. 이것이 공진기의 공진주파수를 변화시켜서 발진주파수를 변화시키는 방법보다 훨씬 선형성이 개선되어 발전기를 설계할 때 유리함을 알 수 있다.

그림 15(b)는 조정전압이 0~10 V 변화할 때 발전기의 출력 변화를 보인 것으로, 출력은 대역 내에서 5.86±1 dBm(4.88~6.84 dBm)로 평탄한 것을 알 수 있다.

그림 15(c)는 가변 전압 6 V, 즉 5.3 GHz에서의 위상잡음 특성으로 100 kHz offset 주파수에서 -104 dBc/Hz로 측정되었다.



그림 15(d)는 조정전압이 변할 때, 일정 주파수 offset에서의 위상잡음 변화를 보여주고 있다. 주파수 offset이 10 kHz일 때, 조정전압에 거의 관계없이 약  $-80$  dBc/Hz의 위상잡음 특성을 보이고, 주파수 offset이 100 kHz일 때, 약  $-104$  dBc/Hz의 일정한 위상잡음 특성을 보인다.

이것 또한 위상천이기를 사용하여 발진주파수를 조정하는 것의 장점이 될 것이다. 일반적으로 공진 주파수를 변화시켜 발진주파수를 조정할 경우, 주파수가 높은 곳에서 혹은 주파수가 낮은 곳에서 전체 품질계수가 나빠져서 위상잡음이 나빠지는 경우가 일반적이다. 그러나 본 논문의 방법은 이러한 현상이 나타나지 않는 것을 알 수 있다.

표 1에서는 본 연구 결과와 실제 시판되는 전압제어유전체공진기발진기를 비교하였다. 본 연구의 전압제어유전체공진기발진기가 가장 넓은 전기적주파수조정범위를 갖는 것을 알 수 있다.

중심주파수와 조정전압, 위상잡음과 주파수조정범위가 각각 다르기 때문에 정확한 비교는 어렵지만, 식 (7)과 식 (9)를 통하여 각각 같은 위상잡음을 가질 때, 전기적주파수조정범위를 대략적으로 계산할 수 있다. 표 1의 마지막 열에 계산 결과를 보였다. 각각의 전압제어유전체공진기발진기가  $-104$  dBc/Hz의 위상잡음으로 동일할 때, 주파수조정범위는 본 연구의 결과가 상용 제품으로 사용할 수 있을 정도의 성능을 보이는 것을 알 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 측정이 용이한 S-파라미터를 이용한 개루프 설계 방법을 적용하여 유전체공진기발진기를 설계, 제작하였다. 발진기의 소신호 발진조건을 언급하고, 이를 만족하도록 발진기를 구성하는 공진부, 위상천이부, 증폭부를 설계하였다. 또한, 전기적주파수조정범위를 개루프 S-파라미터의 균지연에 관한 수식으로 도출하였다. 설계된 공진부와 위상천이부, 증폭부를 페루프로 연결하여 그 성능을 측정하였다. 0~10 V의 조정전압으로 중심주파수 5.3 GHz에서 전기적주파수조정범위는 앞서 수식으로 도출한 값과 근사한 82 MHz를 얻었고, 이는 선형적인 변화를 보였다. 전기적주파수조정범위 내에서

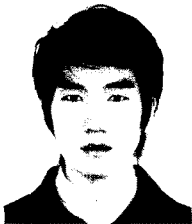
위상잡음은  $-104 \pm 1$  dBc/Hz(@100 kHz offset)로 일정하며, 출력전력은  $5.86 \pm 1$  dBm으로 평탄함을 보였다. 이 결과로부터 전기적주파수조정범위의 도출 방법이 타당함을 검증하였고, 비교를 통해, 상용 제품에 견줄 수 있는 성능을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] J. K. Plourde, C. L. Ren, "Application of dielectric resonators in microwave components", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 29, no. 8, pp. 754-770, Aug. 1981.
- [2] U. L. Rohde, *Microwave and Wireless Synthesizers*, Wiley, 1997.
- [3] 염경환, 능동초고주파회로 설계 입문, 홍릉과학출판사, 2006년.
- [4] 오 바담가라와, 양승식, 오현석, 이만희, 정해창, 염경환, "Ku-대역 유전체공진기발진기의 sampling phase detector를 이용한 위상 고정 루프 필터 설계 및 제작", *한국전자과학회논문지*, 19(10), pp. 1147-1158, 2008년 10월.
- [5] X. Xu, R. Sloan, "Novel varactor tuning of dielectric resonator circuits", *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol. 9, no. 3, Mar. 1999.
- [6] M. Randall, T. Hock, "General oscillator characterization using linear open loop S-parameters", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 49, no. 6, pp. 1094-1100, Jun. 2001.
- [7] R. Rhea, B. Clausen, "Recent trends in oscillator design", *Microwave Journal*, Jan. 2004.
- [8] A. Warburton, "A phase tuned, fixed frequency dielectric resonator oscillator design", *Microwave Conference, 2005 European*, vol. 1, Oct. 2005.
- [9] L. Bo, G. Guang-ding, and X. Bo-le, "Design of X-Band dielectric resonators oscillators", *Microwaves and Millimeter Wave Technology, ICMMT*, pp. 18-21, Apr. 2007.
- [10] L. Zhou, Z. Wu, R. Chu, and J. Mao, "Ultra low noise dielectric resonators oscillators with tuning at Ku band", *Joint Microwave Conference, China-Japan*, pp. 474-477, Sep. 2008.

- [11] D. B. Leeson, "A simple model of feedback oscillator noise spectrum", *Proc of IEEE*, vol. 54, pp. 329-330, 1966.
- [12] J. C. Nallatamby, M. Prigent, M. Camiade, and J. J. Obregon, "Extension of the Leeson formula to phase noise calculation in transistor oscillators with complex tanks", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 51, pp. 690-696, Mar. 2003.
- [13] DRD107UC048, *Dielectric Resonator*, MURATA, Available: <http://www.murata.com/>
- [14] RO4350, *Laminate*, ROGERS, Available: <http://www.rogerscorp.com/>
- [15] L. Chen, R. Forse, and A. H. Cardona, T. C. Watson and R. York, "Compact analog phase shifters using thin-film(Ba, Sr) TiO<sub>3</sub> varactors", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, pp. 667-670, Jun. 2007.
- [16] SMV1245-011, *Varactor Diode*, Skyworks, Available: <http://www.skyworksinc.com/>
- [17] ATC 500S, ATC 545L, *Capacitor*, ATCeramics, Available: <http://www.atceramics.com/>
- [18] HMC313, *GaAs InGaP HBT MMIC Amplifier*, Hittite, Available: <http://www.hittite.com/>
- [19] DRO0408, *Free Running DRO*, Wave Tronics, Available: <http://www.wtt.cn/>
- [20] LO-855-F2B, *Free Running DRO*, LUCIX, Available: <http://www.lucix.com/>
- [21] D. Kajfez, P. Guillon, *Dielectric Resonators*, Artech House, 1986.
- [22] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., 1998.

### 정 해 창



및 시스템 설계

2008년 2월: 충남대학교 전기정보통신공학부 전자전파 정보통신 전공 (공학사)  
 2008년 3월~현재: 충남대학교 전자전파정보통신공학과 전파공학 전공 석사과정  
 [주 관심분야] 초고주파 능동회로

### 양 승 식



대통신인력양성사업단 연구원  
 [주 관심분야] 초고주파 능동회로 및 시스템, MMIC 설계

2003년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)  
 2005년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)  
 2009년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학박사)  
 2009년 3월~현재: 충남대학교 차세대통신인력양성사업단 연구원

### 오 현 석



계

2005년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)  
 2007년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)  
 2007년 3월~현재: 충남대학교 전파공학과 박사과정  
 [주 관심분야] 마이크로파 회로 설계

### 염 경 환



1976년~1980년: 서울대학교 전자공학과 (공학사)  
 1980년~1982년: 한국과학기술원 전기 및 전자과 (공학석사)  
 1982년~1988년: 한국과학기술원 전기 및 전자과 (공학박사)  
 1988년 3월: 금성전기(주) 소재부품연구소 선임연구원 (MIC팀 팀장)  
 1990년 3월: 금성전기(주) 소재부품연구소 책임연구원  
 1991년 5월: 금성정밀(주) 기술연구소 연구1실 책임연구원  
 1991년 8월: (주)LTI  
 1999년 10월~현재: 충남대학교 전파공학과 교수  
 [주 관심분야] 초고주파 능동회로 및 시스템, MMIC 설계