

## A Study on The Analytic Design of the Temperature Compensating Circuit for TCXO

安加藍\* · 朴准奭† · 林在鳳\*\* · 曹洪九\*\* · 宋光鎭\*\*\*  
 (Ka-Ram An · Jun-Seok Park · Jae-Bong Lim · Hong-Goo Cho · Kyuang Jin Song)

**Abstract** - TCXO is one of the most important component in communication systems. We present a analytic method approach to design the Temperature Compensated Circuit. The conventional method for extracting the circuit parameters, which are for thermistor, Colpitts and frequency control circuit is the trial and error correction. In this paper, we analyse the temperature compensating circuit to extract TCXO circuit parameter. In order to show the validity of this paper, we have designed and implemented the 10MHz TCXO. The fabricated TCXO shows 1ppm frequency drift characteristic over the temperature range of -40°C~85°C.

**Key Words** : TCXO, Crystal, Compensate, Thermistor, ppm

### 1. 서 론

TCXO(Temperature Compensation Crystal Oscillator: 온도 보상 수정 발진기)는 이동통신, 무선통신, 의료기기, 군사 시설에 널리 쓰이는 주파수발진회로이다. TCXO는 오랜 시간 동안 온도에 대하여 안정된 신호원을 공급해주는 주된 소자이다.<sup>[1]</sup> TCXO는 써미스터를 이용한 온도보상회로, Colpitts 증폭회로와 주파수 보정회로로 구성된다. 현재 -40°C~85°C의 온도범위에서 2ppm이하의 주파수 안정도를 만족하는 TCXO를 제작하는데 많은 어려움을 겪고 있다. 현재 우수한 주파수 안정도를 갖는 TCXO의 설계방법으로는 주로 반복적 실험을 통한 설계방법이 사용되고 있다. 본 논문에서는 기존 TCXO의 설계상의 문제점을 극복하고자, 주어진 온도 안정도에 대하여 주파수 보상회로를 정확히 설계할 수 있는 해석적 접근 방법을 제안한다. 본 논문에서는 발진기의 기본구성인 공진회로로서 수정진동자를 사용하였고, 사용된 수정진동자의 각도는 AT-CUT<sup>[2]</sup>를 사용하였다. 온도보상회로는 고온을 보상하는 회로와 저온을 보상하는 회로2개로 이루어져 있으며 각각의 보상회로에는 써미스터 1개를 이용한 직접보상방식<sup>[3][4]</sup>를 사용함으로써 소형화가 가능하도록 설계하였다. 본 논문에서 유도한 온도보상회로의 온도에 따른 주파수특성함수를 토대로 하여 온도보상회로의 소자값의 변화에 따른 온

도특성의 영향을 시뮬레이션 하였고, 실제회로에 적용 하였을 때, 본 논문의 결과데이터와 실제 데이터를 비교 분석하여 그 타당성을 나타내었다.

### 2. 본 론

#### 2.1 수정진동자의 등가회로와 CL

그림1 은 수정진동자의 등가회로로  $L_1, C_1, R_1, C_0$ 는 등가 인덕턴스, 관성 커패시턴스, 저항 그리고 극간 용량이다. 저항  $R_1$ 은 일반적으로 수  $\Omega$  이하로 매우 작으며, Q 값은 수 K 이므로 등가회로에서  $R_1$ 은 생략할 수 있다.

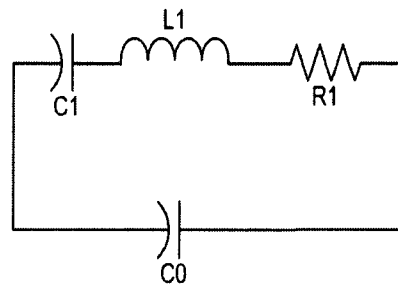


그림 1. 수정진동자의 등가회로도  
 Fig. 1 Equivalent Circuit of Crystal

위의 등가회로를 이용하여 직렬공진 주파수  $f_0$  와 병렬공진 주파수  $f_p$  를 구할 수 있고 수식은 다음과 같다.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (1)$$

† 교신저자, 正會員 : 國民大 工大 電子工學科 助教授 · 工博  
 E-mail : jspark@kookmin.ac.kr  
 \* 學生會員 : 國民大 工大 電子工學科 碩士課程  
 \*\* 正會員 : 國民大 工大 電子工學科 教授 · 工博  
 \*\*\* 正會員 : 崇實大 工大 電子工學科 學士  
 接受日字 : 2004年 5月 25日  
 最終完了 : 2004年 8月 7日

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{C_0 C_1}{C_0 + C_1} L_1}}$$

$$= \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \left(1 + \frac{1}{2} \times \frac{C_1}{C_0}\right) \approx f_0 \quad (2)$$

단,  $C_0 \gg C_1$

만일 용량  $C_L$ (Load Capacitance)이 그림2 와 같이 직렬로 연결되어 있을 경우 전체수정진동자 회로  $C_L$ 과 주파수 변화율의 관계는 다음과 같다.

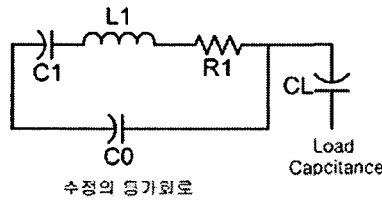


그림 2. 수정진동자에 Load Capacitance가 연결된 경우  
Fig. 2 Crystal with Load Capacitance

$$f_L = f_p(C_L) = f_s \left(1 + \frac{C_1}{2(C_0 + C_L)}\right)$$

$$f_L = f_s + \frac{f_s \times C_1}{2(C_0 + C_L)}$$

$$f_L - f_s = \Delta f = \frac{f_s \times C_1}{2(C_0 + C_L)} \quad (3)$$

$$= \frac{f_s}{2r(1 + C_L/C_0)}$$

단,  $r = C_0/C_1$

보상회로에 관한 수식은 저항, 커패시터, 써미스터로 각 온도의 함수로 된 임피던스 값을 구해준다. 실제 보상 시 필요한 성분은 회로망에서의 커패시터 성분으로 온도에 대한 저항의 변화는 보상회로의 임피던스 변화를 의미하며, 크리스탈의 외부  $C_L$ (Load Capacitance)를 변화 시킨다.[4] 다음의 표는 본 연구에 사용된 수정진동자의 상수 값들을 나타내었다. 수정진동자의 상수 값과 온도특성은 PRA Crystal Chamber를 통해 얻었다.

표 1. 본 연구에 사용된 수정진동자의 상수

Frequency(MHz)	10	10.24	20	25.6
C0(pF)	2.6	2.5	2.3	2.2
C1(fF)	11.4	11.08	11.28	9.5
r=(C0/C1)	228.1	225.6	203.9	232
RR	10.3	13	8.9	8.2
L(mH)	22.3	21.5	6	4.1
Q(k)	136	108	85	80
TS	24.8	24.6	32.2	41.6
$C_L$ (pF)	12.5	12.5	11.5	8.5

## 2.2 온도보상 회로의 소자 값 추출

온도보상 회로는 저온부와 고온부를 분리함으로써 서로 독립적으로 온도보상 기능을 할 수 있도록 해주었다.[3] 다음 수식은 써미스터의 수식이다.

$$R_{Thm} = R_0 e^{B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (4)$$

$R_{Thm}$ 는 써미스터의 저항 값이다.  $R_0$ 는 25°C에서 써미스터 저항 값, B는 써미스터의 상수 값, T는 변화하는 켈빈 온도이고,  $T_0$ 는 25°C에서의 켈빈온도이다. 써미스터는 온도에 따라 그 저항 값이 변한다. 다음은 써미스터를 이용한 온도 보상 회로이다.

$R_{thm}$ 과  $R_p$ 는 병렬로 연결돼 있으며 또한  $R_s$ 와  $C_s$ 는 직렬로 연결돼 있다. 각각의 병렬로 이루어진 회로는 서로 직렬로 연결돼 있으며, 다시 이 회로는  $C_p$ 와 병렬로 연결 돼 있다. 이 회로의 임피던스는 Real 부분과 Imaginary 부분으로 나눌 수 있고, Real 부분의 수식은 수식(5)이고, Imaginary 부분의 수식은 수식(6)과 같다. 그림3은 써미스터를 이용한 온도보상회로의 등가회로도이다. 사용하는 목적에 따라 소자를 생략하고 사용할 수 있다.

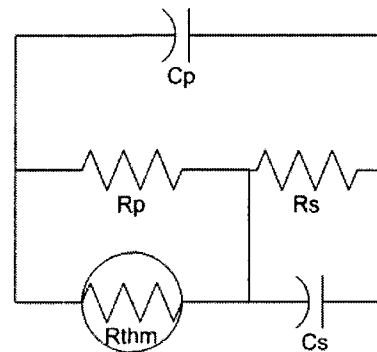


그림 3. 써미스터 회로  
Fig. 3 Circuit of Thermistor

$$\frac{1}{\omega^2 C_p^2 \left[ \left( \frac{R_{Thm} \times R_p}{R_{Thm} + R_p} + \left( \frac{R_s}{1 + \omega^2 R_s^2 C_s^2} \right) \right) \right]}$$

$$\left( \frac{R_{Thm} \times R_p}{R_{Thm} + R_p} + \frac{R_s}{1 + \omega^2 R_s^2 C_s^2} \right) + \left( \frac{\omega R_s^2 C_s}{1 + \omega^2 R_s^2 C_s^2} + \frac{1}{\omega C_p} \right)^2 \quad (5)$$

$$-j \left[ \frac{\left( \frac{R_{Thm} \times R_p}{R_{Thm} + R_p} + \frac{R_s}{1 + \omega^2 R_s^2 C_s^2} \right)^2 + \left( \frac{\omega R_s^2 C_s}{1 + \omega^2 R_s^2 C_s^2} \right) \left( \frac{\omega R_s^2 C_s}{1 + \omega^2 R_s^2 C_s^2} + \frac{1}{\omega C_p} \right)}{\left( \frac{R_{Thm} \times R_p}{R_{Thm} + R_p} + \frac{R_s}{1 + \omega^2 R_s^2 C_s^2} \right)^2 + \left( \frac{\omega R_s^2 C_s}{1 + \omega^2 R_s^2 C_s^2} + \frac{1}{\omega C_p} \right)^2} \right] \quad (6)$$

다음은 고온과 저온부의 각각의 회로를 꾸민 후, 임피던스 값을 수식으로 유도하였다. 먼저 고온의 주파수를 보상할 수 있는 고온보상회로의 써미스터 회로와 임피던스 수식이다.

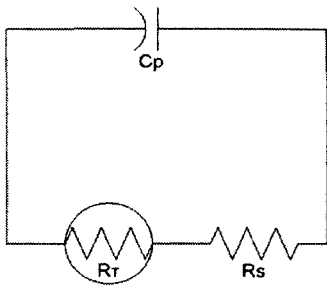


그림 4. 고온부의 써미스터 회로  
Fig. 4 Thermistor Circuit of High Temperature

$$\frac{(R_T + R_S)}{1 + \omega^2 C_p^2 (R_T + R_S)^2} + \frac{-j\omega C_p (R_T + R_S)^2}{1 + \omega^2 C_p^2 (R_T + R_S)^2} \quad (7)$$

그림 4는 고온부의 써미스터 회로를 나타낸 것이고, 수식(7)은 고온부의 써미스터회로의 임피던스( $Z_{thrmH}$ )를 나타낸 식이다. 그림5는 수식(7)에 주파수는 10MHz, Rs값은 20 $\Omega$ , Cp값은 56p, 써미스터의  $R_0$ 값은 1500 $\Omega$  그리고 B상수 값은 3400을 적용한 온도에 따른 Resistance 값과 Reactance 값의 변화를 나타낸 그래프이다.

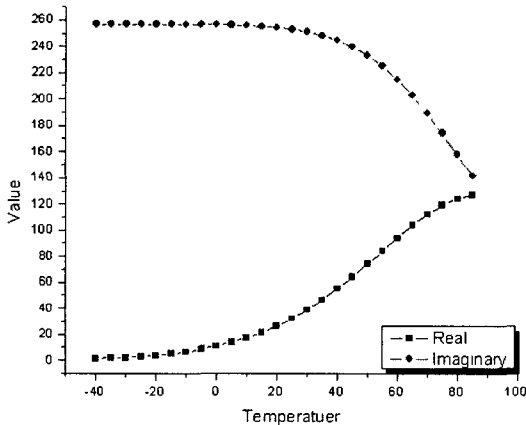


그림 5. 고온부의 Real part와 Imaginary part의 값  
Fig. 5 Characteristic of Real part and Imaginary part in Thermistor Circuit of High Temperature

다음은 저온부의 회로와 임피던스 수식이다.

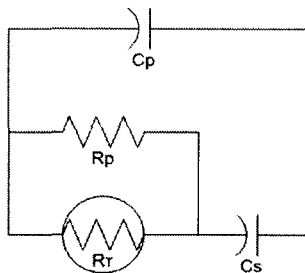


그림 6. 저온부의 써미스터 회로  
Fig. 6 Thermistor Circuit of Low Temperature

$$\frac{\frac{1}{\omega^2 C_p^2} \left( \frac{R_T \times R_P}{R_T + R_P} \right)}{\left( \frac{R_T \times R_P}{R_T + R_P} \right)^2 + \frac{1}{\omega^2} \left( \frac{1}{C_S} + \frac{1}{C_P} \right)^2} \quad (8)$$

$$\frac{\frac{1}{\omega C_P} \left\{ \left( \frac{R_T \times R_P}{R_T + R_P} \right)^2 + \frac{1}{\omega^2 C_S} \left( \frac{1}{C_S} + \frac{1}{C_P} \right) \right\}}{\left( \frac{R_T \times R_P}{R_T + R_P} \right)^2 + \frac{1}{\omega^2} \left( \frac{1}{C_S} + \frac{1}{C_P} \right)^2} \quad (9)$$

그림 6은 저온부의 회로를 나타낸 것이고, 수식(8)과 (9)는 저온부의 써미스터회로의 임피던스( $Z_{thrmL}$ )를 나타낸 식이다. 수식(8)은 임피던스의 Real part이고 수식(9)는 Imaginary part이다. 그림7은 수식(8)과(9)에 주파수는 10MHz, Rp값은 2k $\Omega$ , Cs값은 560pF, Cp값은 51pF, 써미스터의  $R_0$ 값은 40 $\Omega$ , B상수 값은 2750을 적용한 결과를 나타낸 것이다.

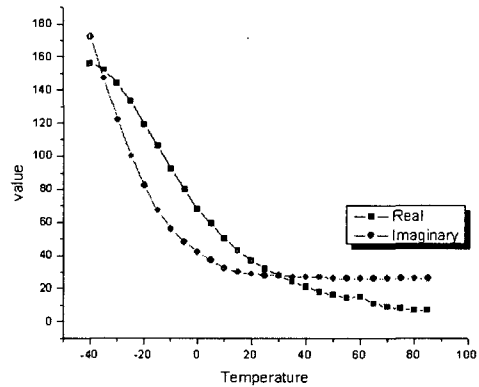


그림 7. 고온부의 Real part와 Imaginary part의 값  
Fig. 7 Characteristic of Real part and Imaginary part in Thermistor Circuit of Low Temperature

그림 8은 수정의 온도특성과 보상회로의 온도특성을 보여주는 그래프이다. 여기서 ppm(part per million)으로써 기준 주파수의 100만분의 1의 값을 나타낸 것이다. 그림9는 10 MHz 수정을 이용한 TCXO의 실제 온도특성과 위에 수식에 의해 설계된 TCXO의 온도특성과 비교한 그래프이다.

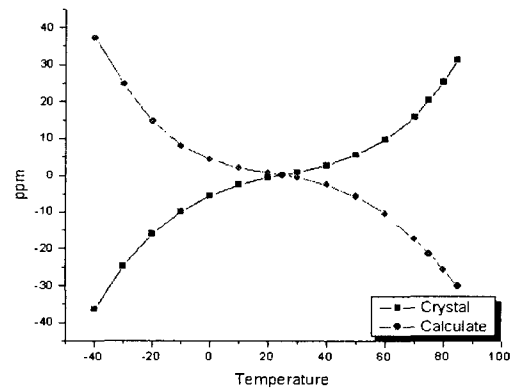


그림 8. 수정의 온도특성과 보상회로의 온도특성  
Fig. 8 Temperature Characteristic of Crystal and Compensating Circuit

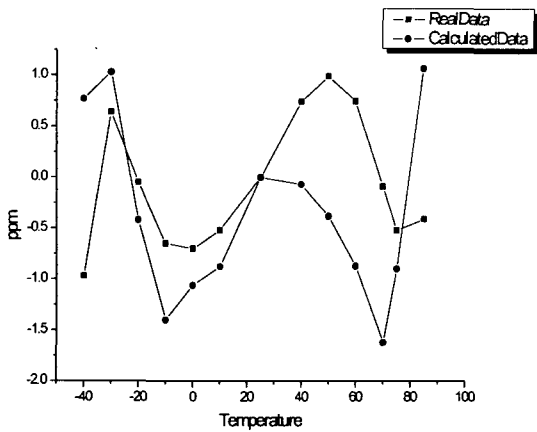


그림 9. 설계된 TCXO의 실제 온도특성과계산된 TCXO의 온도특성  
 Fig. 9 Temperature Characteristic of Measured TCXO Data and Calculated TCXO Data

그림 8은 실제 10MHz 수정진동자의 온도특성과 수식으로 계산된 보상회로의 온도에 따른 임피던스의 값을 나타낸 것이다. 그래프에서 보이듯이 보상회로의 값들은 수정의 온도특성과 반대되는 특성을 보이므로 보상회로가 잘 이루어졌음을 알 수 있다. 그림9는 수식으로 보상을 시킨 TOXO회로의 온도특성과 SE2000 TCXO Chamber를 이용하여 제품을 측정 했을 때의 온도특성을 비교한 그래프이다.

2.3 온도보상 회로의 소자 값 추출

온도보상회로 중 고온보상회로에서 Cp와 Rs 값과 저온 보상회로에서 Cp, Rp, Cs값이 각각 변할 때 주파수 보상에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보겠다. 그림 10은 고온보상회로에서 Cp값만을 바꾸었을 경우 온도에 대한 주파수특성을 나타낸 그래프이다.

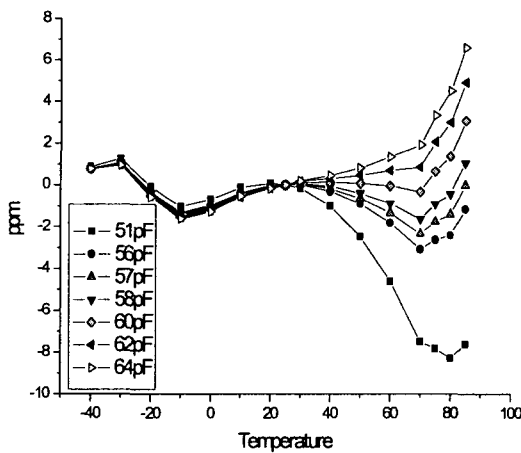


그림 10. 고온보상회로에서 Cp를 변환시켰을 때 온도와 주파수와의 관계  
 Fig. 10 Temperature vs Frequency Characteristic at variation of Cp in Thermistor Circuit of High Temperature

그림10에서 고온보상회로에서 Cp를 변환시켰을 경우 주파수 10MHz에서 1pF당 85°C에서 1ppm 정도 변한다. 고온이 변하는 것에 비해 저온이 거의 변하지 않는다. 고온보상회로에서 Cp를 바꾸었을 경우 Cp의 값이 낮아질 때 출력주파수가 올라가고 Cp의 값이 높아질 때 출력주파수가 내려간다. 다음은 고온보상회로에서 Rs값만을 바꾸었을 경우 온도에 대한 주파수특성을 나타낸 그래프이다.

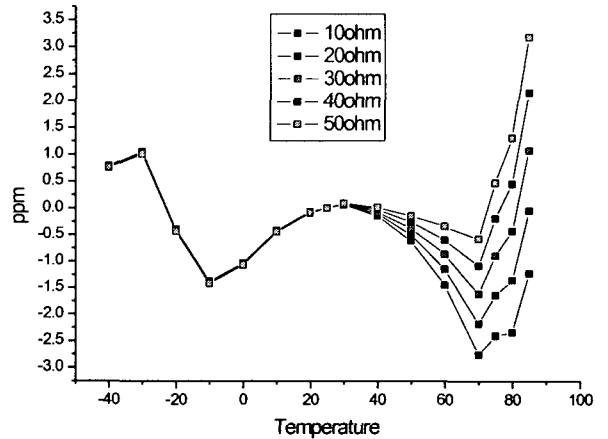


그림 11. 고온보상회로에서 Rs를 변환시켰을 때 온도와 주파수와의 관계  
 Fig. 11 Temperature vs Frequency Characteristic at variation of Rs in Thermistor Circuit of High Temperature

그림 11에서 고온보상회로에서 Rs를 변환시켰을 경우 주파수 10MHz에서 10Ω당 85°C에서 1ppm 정도 변한다. 고온이 변하는 것에 비해 저온이 변하지 않는다. 고온보상회로에서 Rs를 바꾸었을 경우 Rs의 변화에 출력주파수가 변화는 없다. 다음은 저온보상회로에서 Cp값만을 바꾸었을 경우 온도에 대한 주파수특성을 나타낸 그래프이다.

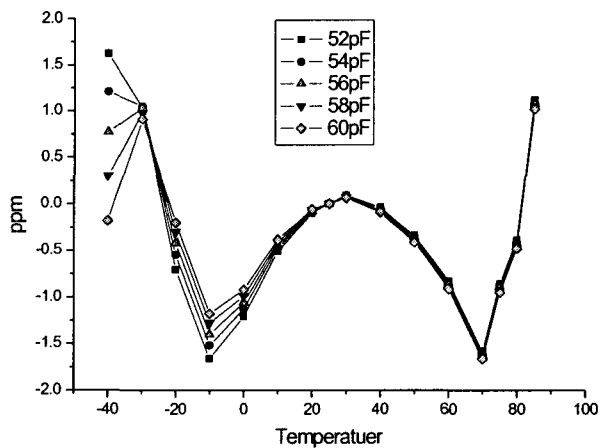


그림 12. 저온보상회로에서 Cp를 변환시켰을 때 온도와 주파수와의 관계  
 Fig. 12 Temperature vs Frequency Characteristic at variation of Cp in Thermistor Circuit of Low Temperature

그림 12에서 저온보상회로에서 Cp를 변환시켰을 경우 주파수 10MHz에서 1pF당 -40℃만 0.5ppm 정도 변한다. Cp는 오직 -40℃만을 보상한다. 이 값 역시 커패시터의 값이 낮아질 때 출력주파수는 올라가고, 커패시터의 값이 높아지면 출력주파수는 내려간다. 다음은 저온보상회로에서 Cs값만을 바꾸었을 경우 온도에 대한 주파수특성을 나타낸 그래프이다.

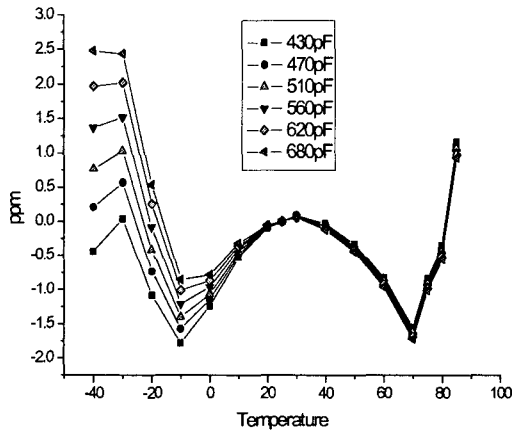


그림 13. 저온보상회로에서 Cp를 변환시켰을 때 온도와 주파수와의 관계

Fig. 13. Temperature vs Frequency Characteristic at variation of Cs in Thermistor Circuit of Low Temperature

그림 13에서 저온보상회로에서 Cs를 변환시켰을 경우 주파수 10MHz에서 40pF당 -40℃에서 약 0.5ppm 변한다. Cs는 낮은 온도에서 변화를 하며 높은 온도에 영향을 끼치지 않는다. 이 값 역시 커패시터의 값이 낮아질 때 출력주파수는 올라가고, 커패시터의 값이 높아지면 출력주파수는 내려간다. 다음은 저온보상회로에서 Rs값만을 바꾸었을 경우 온도에 대한 주파수특성을 나타낸 그래프이다.

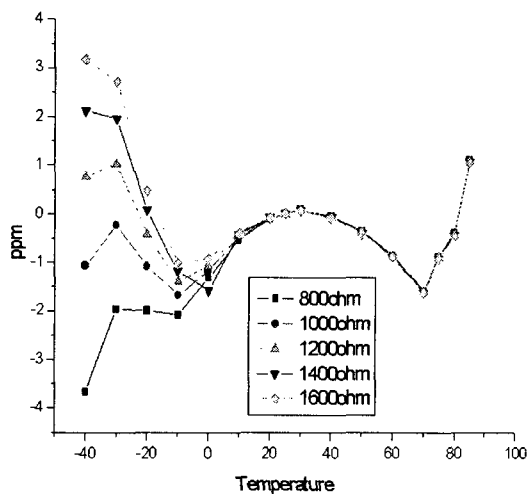


그림 14. 저온보상회로에서 Rs를 변환시켰을 때 온도와 주파수와의 관계

Fig. 14 Temperature vs Frequency Characteristic at variation of Rs in Thermistor Circuit of Low Temperature

그림14에서 저온보상회로에서 Rs값을 변환시켰을 경우 주파수 10MHz에서 200Ω당 -40℃에서 1.2ppm 정도 변한다. Cs는 -20℃보다 -40℃가 큰 폭으로 변화한다. Rs 값의 변화는 출력주파수에 영향을 주지 않는다.

### 3. 결 론

TCXO회로에서 각 소자들이 온도에서 어떤 영향을 끼치는 지 함수를 통해 알았다. 함수를 통해 -40℃~85℃에서 2ppm을 만족하는 소자 값들을 추출한 후, 실제 회로에 적용하였고, 1번의 소자 값의 수정으로 1ppm을 만족하는 TCXO를 얻을 수 있었다. 그 후에 수식을 이용해 TCXO에서 각 소자가 온도에 대해 어떠한 경향을 보이는지 실험과 수식을 비교 분석했다. 함수에서 각 소자 값의 변화에 따른 온도특성의 변화는 실제 제작 후 각 소자들의 변화에 따른 온도특성변화가 일치하는 것을 발견하였다. 기존에 설계자가 여러 번의 실험으로 파라미터 값들을 추출하였다면, 이 파라미터들의 함수를 제공함으로써 설계자가 제품을 만드는데 시간을 단축시킬 수 있는 이점이 있고, 각 소자들이 각 온도에서 어떤 영향을 미치는 지도 쉽게 파악할 수 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] S.Okano, T.M. and T.O., "Direct Temperature Compensated Crystal Oscillator for Advanced VHF/UHF Radio Communication Systems", Proc.34th AFCS, pp. 488-493, 1980.
- [2] Martin, J.J., "Radiation induced frequency offsets and acoustic loss in AT-cut quartz crystals", 43rd Annual Symposium on Frequency Control, pp. 526-535, 1989.
- [3] Bob Achille, Tim Collins and Dennis Marvin, "Manufacturing Hybrid TCXOs", IEEE IFCS, pp. 679-686, 1993.
- [4] SEIKO EPSON, "The Crystalmaster", Product catalog, 1997.
- [5] 신두식, 신희숙, 오재용, 김재정, "MOSFET 밀러 용량을 이용한 넓은 기변폭의 VC-TCXO", 춘추 마이크로파 및 전파학술대회 논문집 VOL.21 NO1, pp. 65-68, 98/5/23.
- [6] Noriyuki watanabe, Koji Takazawa and Jun Kusano, "Doubly rotated quartz crystal resonator for miniaturized VC-TCXO in mobile phone", IEEE IFCS, pp. 119-127, 2002.
- [7] T.Keller, D. Marvin and R. Steele, "Integrated Circuit Compensation of A.T. Cut Crystal Oscillator," Proceedings of the 34th Annual Symposium of Frequency Control, pp. 498-503, 1980.
- [8] LN. Dworsky, "AT Quartz Strip Resonators," Proceedings of the 34th Annual Symposium of Frequency Control, pp. 295-302, 1987.

저 자 소 개



안 가 람 (安 加 藍)

1979년 1월 29일생  
2001년 국민대 정보통신 공학과 졸업  
2004년~현재 국민대 전자공학과 석사과정  
Tel : 02-910-5072, Fax : 02-910-4646  
E-mail : taoptaop@hotmail.com



조 홍 구 (曹 洪 九)

서울대학교 전기공학과 학사  
서울대학교 전기공학과 석사  
서울대학교 전기공학과 박사  
경력 및 활동 : 국민대학교 RF/MMIC 연구소/소장 (93~97)  
미국, 콜로라도 대학교 전기공학과/객원교수(1998)  
대한전자공학회 마이크로파 및 전파연구회/위원장(95~96)  
국민대학교 / 총무처장 (97~00)  
미국, 시라큐스대학교 / 객원교수 (01)  
국민대학교 공과대학  
전자정보통신공학부/교수 (80~현재)  
Tel : 02-910-4705  
Fax : 02-910-4449  
E-mail : hgcho@kookmin.ac.kr



박 준 석 (朴 准 奭)

1991년 : 국민대학교 전자공학과 학사  
1993년 : 국민대학교 전자공학과 석사  
1996년 : 국민대학교 전자공학과 박사  
경력 및 활동 : Dept. of EE, UCLA/P.D. Fellow(97~98)  
순천향 대학교 정보기술공학부/조교수(03)  
(주) 아모텍 / 기술고문(00~현재)  
(주) Wavics / 기술고문(01~현재)  
국민대학교 공과대학 전자정보통신공학부 / 조교수(03~현재)  
주요연구분야 : RFIC, MMIC, LTCC 기술을 이용한 RF/Microwave 하이브리드 모듈 디자인 및 해석  
Tel : 02-910-4829, Fax : 02-910-4646  
E-mail : jspark@kookmin.ac.kr



송 광 진 (宋 光 鎭)

숭실대학교 전기, 전자공학과 학사  
Tel : 031-707-3602, Fax :  
E-mail : kjsong@seoan.com



임 재 봉 (林 在 鳳)

서울대학교 전기공학과 학사  
서울대학교 전기공학과 석사  
서울대학교 전기공학과 박사.  
경력 및 활동 : 충남 대학교 공과대학 전자공학과/조교수  
미국 텍사스 주립대학교 전기공학과/조교수  
한국통신학회/이사  
SKT, 흥창, 삼성전자, Netel,A-telsys/기술고문  
제 21회 산학협동대상 수상  
국민대학교 전자정보통신공학부/교수  
주요연구분야 : GPS 시스템 application,  
셀룰라/IMT-200용 광증계기 설계  
Tel : 02-910-4703, Fax : 02-910-4646  
E-mail :