

소리굽쇠 수정발진기의 크기에 따른 전기적인 특성변화에 대한 실험적 연구

논문
58-12-18

Experimental Investigation of Size Dependent Electrical Parameters of Tuning Fork Crystal Oscillators

송상헌*
(Sang-Hun Song)

Abstract - We performed frequency response measurements of four tuning fork crystal oscillators with different sizes and analyzed their measured electrical equivalent circuit parameters of R , L , C_S , and C_P as functions of the linear dimensions, length, width, and thickness. We observed that R and L showed an decreasing behavior with increasing length while C_S , and C_P showed an increasing behavior. Similar dependences of the electrical parameters on thickness were also observed. On the contrary, any noticeable dependence of these parameters on width has not been found.

Key Words : Tuning fork, Sensor, Equivalent circuit, Admittance, Frequency response

1. 서론

소리굽쇠(Tuning fork)는 안정성과 공진에서의 높은 Quality factor로 인하여, 음악기기와 발진소자 등 다양한 분야에 응용이 되어왔다. 특히 수정(quartz)의 압전효과를 이용한 소리굽쇠는 2^{15} 인 32768Hz에서의 안정적인 주파수 발진이 가능하며, 다양한 시계에 기준주파수 발생기로 사용된다. 소리굽쇠의 공진주파수는 소리굽쇠의 모양, 특히 소리굽쇠의 길이와 두께에 의하여 주로 결정된다. 소리굽쇠를 두 개의 연결된 cantilever로 모델링하여 계산한 기본공진주파수는 다음의 식 (1)과 같이 근사된다 [1].

$$w_1 = \frac{1.76t}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

여기서, L 은 소리굽쇠의 한쪽 팔의 길이, t 는 두께, $E=10^{11}N/m^2$ 으로 수정의 Young's modulus, $\rho=2650 kg/m^3$ 는 수정의 밀도이다. 따라서, 다양한 길이와 두께를 갖고 있으면서, 같은 공진주파수를 갖는 수정발진기의 제조가 가능하고, 여러 제조회사들은 나름의 크기를 정하여 저렴한 가격으로 수정발진기를 제조, 보급하고 있다.

최근에는 이 저렴한 소리굽쇠 수정발진기를 이용하여, 힘 [2] 및 질량 센서로[3] 이용하려는 시도가 진행되고 있다. 소리굽쇠 수정발진기를 센서로 이용하려면, 그의 전기적인 특성에 대한 정확한 정보가 필요하다. 이를 이용하여 주변회로를 포함하여 최적화된 센서시스템의 설계가 가능하기 때문이다. 소리굽쇠 수정발진기의 전기적인 등가회로는

Butterworth-Van Dyke모델로 알려져 있고, 그림 1의 오른쪽 위의 삽입도와 같이 RLC_S 직렬공진회로와 병렬로 연결된 기생성분의 C_P 로 구성되어 있다. 최근에는 Dual-phase lock-in amplifier를 이용한 admittance 측정법이 개발되어, 각각의 등가회로 성분들에 대한 값을 비교적 쉽게 추출하는 것이 가능하게 되었다 [4]. 그림 1에 참고문헌 [4]에서 발췌한, 함수발생기와 Dual-phase Lock-in amplifier, 그리고 이들을 제어하는 컴퓨터로 구성된 측정장치를 도시하였다.

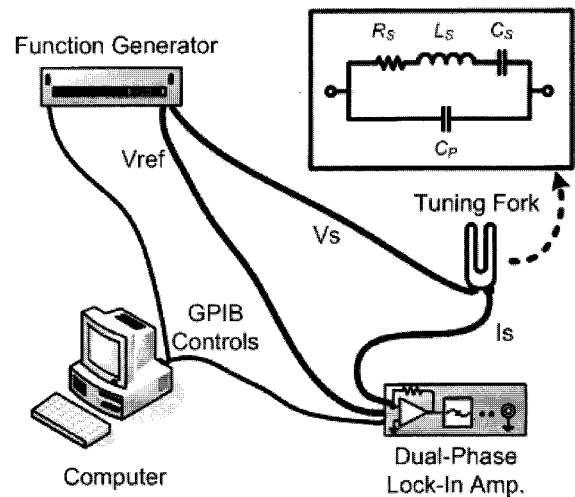


그림 1 함수발생기, Dual-phase lock-in amplifier, 제어용 컴퓨터를 포함하는 측정장치 개략도. 오른쪽 위의 삽입도는 소리굽쇠의 등가회로이다 [4].

Fig. 1 Experimental setup consisting of a function generator, a dual-phase lock-in amplifier, and a computer that controls the setup. The top-right inset shows the equivalent circuit model of a tuning fork crystal oscillator [4].

* 정 회 원 : 중앙대학 전자전기공학부 부교수 · 공박

E-mail : shsong@cau.ac.kr

접수일자 : 2009년 10월 30일

최종완료 : 2009년 11월 4일

본 논문에서는 시중에서 구입이 가능한 다양한 소리굽쇠 수정발진기의 전기적인 특성을 소리굽쇠 형태의 길이, 두께, 그리고 폭에 대하여 정리함으로써, 센서로 사용할 경우에 필요한 기초적인 정보를 제공하고자 한다. 즉, 소리굽쇠 수정발진기의 크기의 변화에 따른 등가회로 성분의 전기적인 특성의 변화를 측정하여, 센서로의 응용시스템 설계에 필요한 기본 자료를 제공하고자 한다.

2. 본 론

각각 다른 제조회사에서 만든 4 가지의 소리굽쇠 수정발진기를 시중에서 구입하여 그들의 특성을 측정하였다. 기계적인 특성을 측정하기 위하여, 진공으로 포장된 원통형의 금속용기를 벗기고, 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope; SEM)을 사용하여 길이, 두께, 폭을 측정하였다. 이 결과를 표 1에 정리하였다. 사용된 주사전자현미경은 일본 JEOL사의 7001F 모델이고, 길이측정에서의 오차는 작은 배율의 동작에서의 구면수차(Spherical aberration)에 의한 것이다. 표 1의 첫 번째 행의 샘플 3번의 주사현미경 사진을 그림 2에 보였다. 그림 2의 윗부분의 삽입도에 소리굽쇠의 개략도를 각각의 길이 부호와 함께 표시하였고, 아래쪽의 삽입도는 소리굽쇠 샘플 3번을 우측에서 찍은 사진을 표시한 것이다. 표 1의 마지막 행에는 전기적인 측정을 통하여 얻은 공진주파수를 나열하였다. 표 1에서 알 수 있듯이, 4개의 수정발진기는 길이, 폭, 두께의 크기가 모두 서로 다름에도 불구하고, 공진주파수는 목표치인 32768 Hz에 매우 근접한 값을 갖는다. 주파수 발생기의 응용으로는 모두 같은 성능을 보인다고 볼 수 있다.

그러나 이들을 센서로 응용하기 위해서는 다른 전기적인 특성에 대한 연구가 수행되어야 하고, 이를 위해서 최근에 개발된 Lock-in amplifier를 이용한 복소 admittance 측정기법을 이용하였다 [4]. 소리굽쇠 발진기는 10^4 이상의 매우 큰 Q값을 가지고 있어서, 매우 좁은 주파수 범위에서 세밀한 주파수응답을 측정해야하는 제한사항을 가지고 있다. 이를 위하여 본 측정에서는 0.01 Hz의 정밀도를 가진 함수발생기를 사용하여 50 Hz의 범위에 한정하여 측정하였다.

표 1 서로 다른 4가지의 소리굽쇠 수정발진기의 기계적인 특성과 전기적인 특성 측정치

Table 1 The manufactures and the measured mechanical and electrical characteristics of the 4 collected tuning fork crystal oscillators.

샘플 번호	제조사, 부품번호	길이, L [mm]	폭, w [mm]	두께, t [mm]	공진주파수, f_r [Hz]
1	Sunny, CH-308	3.85 ± 0.05	0.30 ± 0.01	0.60 ± 0.02	32764.62
2	Fox, NC26	3.25 ± 0.05	0.31 ± 0.01	0.35 ± 0.01	32764.83
3	Citizen, CFS145	2.50 ± 0.05	0.10 ± 0.01	0.25 ± 0.01	32765.36
4	Seiko, VT-150	2.33 ± 0.05	0.13 ± 0.01	0.23 ± 0.01	32765.08

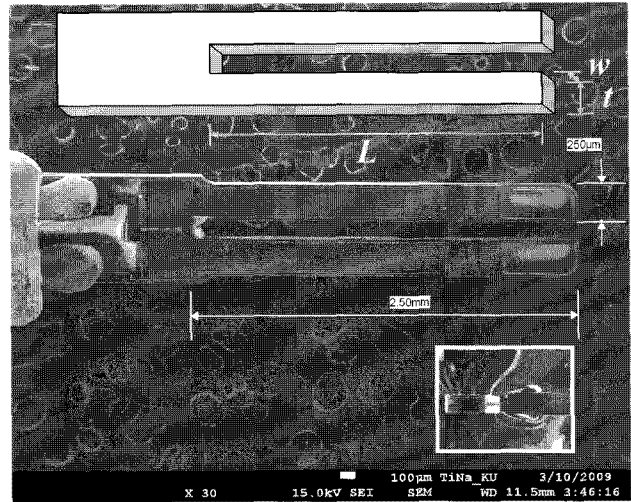


그림 2 3번 샘플의 주사전자현미경 사진. 윗 부분의 개략도는 소리굽쇠의 주요 길이에 대한 부호를 표시하고, 우측 아래 부분의 사진은 오른쪽의 방향에서 찍은 모양을 표시한다.

Fig. 2 A SEM picture of sample 3. The upper inset shows the schematic diagram of the tuning fork to indicate the dimensions and the bottom-right inset shows the picture taken from the right side.

소리굽쇠의 전기적인 등가회로의 복소 admittance는 식 (2)와 같이 표시된다.

$$Y(j\omega) = \frac{j\omega C_P \left(-\omega^2 + j\omega \frac{R}{L} + \frac{1}{LC_T} \right)}{-\omega^2 + j\omega \frac{R}{L} + \frac{1}{LC_P}} \quad (2)$$

여기서, $C_T = C_S C_P / (C_S + C_P)$ 이다.

실수부의 공진주파수에서의 값은 $1/R$ 이고, 반치폭(Full Width at Half Maximum)은 R/L 이다. 그리고, Quality factor가 1보다 큰 경우, 공진주파수, $\omega_S = 1/\sqrt{LC_S}$ 와 $\omega_P = 1/\sqrt{LC_T}$ 에서의 허수부의 값은 0에 근접한다. 이 관계식으로부터 등가회로의 각각의 성분들의 값을 추출할 수 있다.

그림 3에 샘플 2번의 복소 admittance를 주파수의 함수로 측정한 결과를 보였다. 그림 3(a)에는 복소 admittance의 크기와 위상에 대한 주파수응답을 보였고, 삽입도에는 실험장치의 등가회로를 소리굽쇠의 등가회로와 직렬연결된 외부 저항으로 표시하였다. 그림 3(b)에는 Dual-phase lock-in amplifier의 설정을 실수부와 허수부 측정으로 바꾸어 다시 측정한 복소 admittance의 주파수응답을 도시하였고, 이 응답으로부터 얻은 각각의 소자값을 삽입도에 정리하였다. 소자의 등가회로 성분값 추출을 위해 사용한 변수들의 값은 다음과 같다. 측정된 실수부의 공진주파수에서의 저항값은 26.94 K Ω 이고, 반치폭은 0.58 Hz이고, 허수부의 영교차점은 각각 32764.83, 32782.90 Hz이다. 공진주파수에서 20 K Ω 의 시험저항을 소리굽쇠 발진기를 대신하여 삽입하고, 측정

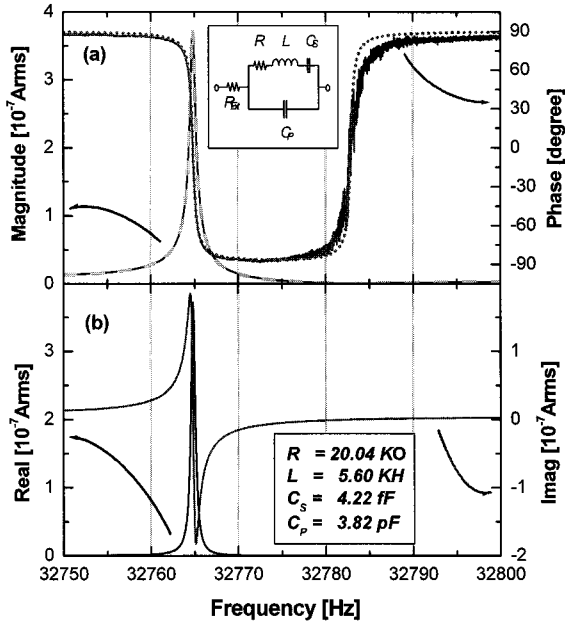


그림 3 샘플 2번에 대한 복소 admittance traces: (a) 크기와 위상 측정(실선) 그리고 추출된 등가회로 값으로 계산된 admittance(파선과 점선). 위쪽의 삽입도는 실험 장치의 등가회로를 표시함. (b) 실수부와 허수부의 admittance. 아래쪽 삽입도에 측정 admittance에서 추출된 등가회로의 값을 표시함.

Fig. 3 Measured complex admittances of sample 2: (a) magnitude and phase components (solid-lines) and their corresponding calculated components (dotted and dashed lines). The top inset shows the equivalent circuit of the experimental setup. (b) real and imaginary components. The bottom inset shows the extracted parameter values for the tuning fork.

한 외부저항값은 6.55 KΩ 이다. 이 소자값을 다시 외부저항을 고려하여, 식 (2)에 대입하여 얻은 계산된 크기와 위상에 대한 결과를 다시 그림 3(a)에 도시하였다. 실험치와 이론치가 거의 완벽하게 일치하는 것을 그림 3으로부터 알 수 있다. 이러한 과정을 표 1에 정리된 모든 샘플에 대하여 반복하여 각각의 등가회로 소자에 대한 값을 추출하였다. 실험은 일관성을 위하여 32750에서 32800 Hz까지 측정하였고, 함수 발생기의 정현파 출력의 크기는 10 mVrms 로 모두 동일하게 유지하였다.

측정된 모든 소자들의 값을 소리굽쇠의 크기와 관련된 길이, 폭, 두께에 대하여 정리하여 그림 4에 도시하였다. R과 L은 길이와 두께에 대하여 그 크기가 증가함에 따라 감소하는 특성을 보이고, 폭과 관련하여서는 두드러진 특성을 보이지 않는다. R은 L에 비하여 길이의 증가에 대한 감소가 더욱 크고, 이는 길이가 증가함에 따라 Quality factor, $Q = \omega_s L / R$ 이 길이에 따라 증가함을 의미한다. 즉, 센서 활용 측면에서 길이가 긴 소리굽쇠를 사용하는 것이 유리함을 내포한다고 볼 수 있다. 또한 R은 물리적으로는 센서에서의 진동손실 정도를 나타내므로 작을수록 센서의 신호유지 측면에서 도움이 된다고 볼 수 있다. C_s 와 C_p 는 반대로

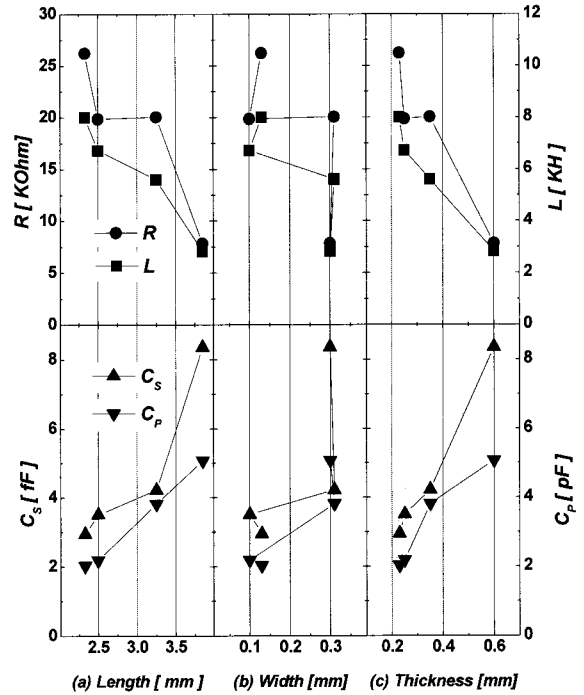


그림 4 측정된 등가회로 값의 소리굽쇠 크기 의존성: (a) 길이(L) 의존성, (b) 폭(w) 의존성, (c) 두께(t) 의존성

Fig. 4 The dependences of electrical parameters R, L, Cs, and Cp of the tuning forks on their linear dimensions (a) length, (b) width, and (c) thickness.

길이와 두께에 대하여 감소하는 특성을 보이고, 폭과 관련하여서는 마찬가지로 두드러진 특성을 찾을 수 없었다. 기생성분의 capacitance인 C_p 는 길이와 폭이 증가함에 따라 면적이 넓어져 증가하고, C_s 는 L의 감소에 대한 대응으로, 공진 주파수 $\omega_s = 1/\sqrt{LC_s}$ 를 유지하기 위해서 증가한다고 해석된다.

3. 결론

저가의 고성능 센서로의 응용이 모색되고 있는 소리굽쇠 주파수발진기의 등가회로 성분의 값을 추출하기 위하여 복소 admittance의 주파수 응답을 측정하였다. 시중에서 저렴하게 구입한 서로 다른 크기의 4개의 소리굽쇠 수정주파수 발진기에 대하여 길이, 폭, 두께와 같은 크기를 측정하고, 전기적인 특성인 등가회로 성분을 측정하여 이들 사이의 연관성을 발견하였다. 소리굽쇠의 길이와 두께가 증가하면, R, L이 감소하고 반면에 C_s 와 C_p 는 증가한다. 소리굽쇠의 폭에 대하여는 특별한 관계를 찾을 수 없었다. 이로부터 높은 Q가 필요한 센서의 응용에는 길이가 긴 소리굽쇠형 수정발진기를 사용하는 것이 유리함을 보였다. 또한, 소리굽쇠의 길이와 등가회로의 저항성분의 크기와의 연관성으로부터, 손실적인 신호유지를 위하여도 길이가 긴 소리굽쇠를 사용함이 유리함을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] J.-M. Friedt and E. Carry, "Introduction to the quartz tuning fork," Am. J. Phys. 75, 415 (2007).
- [2] F. J. Giessibl, "High-speed force sensor for force microscopy and profilometry utilizing a quartz tuning fork," Appl. Phys. Lett. 73, 3956 (1998).
- [3] G. Zeltzer, J. C. Randel, A. K. Gupta, R. Bashir, S.-H. Song, and H. C. Manoharan, "Scanning optical homodyne detection of high-frequency picoscale resonances in cantilever and tuning fork sensors" Appl. Phys. Lett. 91, 173124 (2007).
- [4] S.-H. Song, "Electrical characterization of a tuning fork crystal oscillator using dual-phase lock-in technique," Rev. Sci. Instrum. 80, 034703 (2009).

저 자 소 개



송 상 헌 (宋尙憲)

1986년: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1988년: 미국 Princeton Univ. (M. A.)
 1997년: 미국 Princeton Univ. (Ph. D.)
 1997년~1999년: (주)LG반도체 책임연구원보.
 1999년~2000년: 서울시립대학교 양자정보처리연구단 연구위원.
 2000년~2001년: 고려대학교 BK21 정보처리연구단 계약교수.
 2001년~현재: 중앙대학교 전자전기공학부 부교수. <주관심분야> 반도체 소자 및 시스템, 양자전자공학