

측은 저항체 온도 센서를 이용한 온도차-주파수 변환기

(A Temperature Difference-to-Frequency Converter Using Resistance Temperature Detectors)

鄭元燮*, 金弘培*

(Won Sup Chung and Hong Bae Kim)

要 約

2 개의 측은 저항체 온도 센서(RTD)를 이용한 온도차-주파수 변환기를 개발했다. 2 개의 측은 저항체 온도 센서(RTD)의 저항차는 콜피츠 발진기의 공진 회로를 형성하는 등가 인덕턴스로 변환된다. 제안한 변환기는 35℃에서 155℃의 온도차 범위에서 16Hz/℃의 변환 감도와 2.15%의 최대 직선 오차를 나타낸다. 발진기 자체의 주파수 드리프트는 ±0.5Hz이다. 따라서, 최소 검출 가능 온도차는 ±0.013℃로 평가된다. 측은 저항체 온도 센서(RTD)을 제외한 모든 회로는 모노리딕 IC형태로 제작할 수 있다.

Abstract

A novel temperature difference-to-frequency converter using two resistance temperature detectors (RTD) has been developed. The resistance difference of two RTD is converted into its equivalent inductance to form the resonant circuit of the Colpitts oscillator. The conversion sensitivity of 16 Hz/°C and the residual nonlinearity less than 2.15% over the temperature difference range from 35°C to 155°C are obtained by the prototype converter. The frequency drift of oscillator itself is ± 0.5Hz. Thus, the minimum detectable temperature difference is estimated to be ± 0.013°C. The proposed coverter, except for two RTD, can be fabricated in monolithic IC form.

I. 서 론

고성능이고, 값싼 마이크로 컴퓨터는 데이터처리, 전기통신, 가전제품, 산업 프로세스 제어, 수송기관, 그리고 의료기기에 있어서의 급속한 발달을 재촉하고 있다. 이들의 분야에 마이크로 일렉트로닉스를 새롭게 적용하기 위해서는 계측 제어 시스템의 개발이

필요하다. 계측 제어 시스템에 있어서의 신호처리는 마이크로 컴퓨터를 이용하여 용이하게 실현된다. 따라서, 현재 그리고 장래의 연구의 초점은 주변기기 특히, 센서(sensor), 액추에터(actuator) 그리고 이들과 마이크로 컴퓨터를 결합시키는 인터페이스(interface)의 개발에 있다.^{1,2)} 센서와 인터페이스를 간단한 반도체 프로세스로 일체화시키고, 마이크로 컴퓨터와 높은 신뢰도로 결합시키기 위해서는 직접화하기 쉬운 고정도(high accuracy)의 인터페이스가 필요하게 된다.^{3,4)}

*正會員, 淸州大學校 半導體工學科
(Dept. of Semiconductor Eng., Chongju Univ.)
接受日字: 1988年 6月 25日

저항형 센서는 물리량 또는 화학량의 변화에 대응하여 저항이 변화하는 소자로, 온도, 습도, 압력, 각종 가스 측정에 널리 사용되고 있다.^[5,6] 센서의 저항 변화를 디지털량으로 변환시키는 방법은 크게 두가지로 나누어진다. 하나는 센서를 동조형 발진기나 이장 발진기(relaxtion oscillator)의 주파수 또는 시간 간격 결정 소자로 사용하는 방법이고,^[7~9] 다른 하나는 센서의 저항을 전압 또는 전류로 변환시킨 후, 전압-주파수 변환기(VFC)나 애널로그-디지털 변환기(ADC)를 사용하여 다시 디지털 형식으로 변환시키는 방법이다. 전자적 방식은 회로 구성이 비교적 간단하나, 분해능이 낮은 결점을 갖는다. 한편, 후자의 경우에는 고성능 VFC나 ADC를 변환 소자로 사용함으로써 높은 분해능의 시스템을 실현시킬 수 있다. 하지만, 전체 회로의 구성이 복잡해지는 결점을 갖는다.

본 논문에서는 인덕턴스 시뮬레이션에 기초를 둔 전압 제어 발진기를 VFC로 사용한 새로운 저항-주파수 변환기를 제안한다. 제안한 저항-주파수 변환기는 회로 구성이 간단하고 고정도이며 높은 분해능을 갖는다. 제안한 변환기를 측온 저항체 온도 센서(RTD)에 응용하여 온도차-주파수 변환기를 실현시켰다. 본 절에 이어 II절에서는 온도차-주파수 변환기의 회로 구성 및 동작 원리에 대해서 설명하고, III절에서는 실험 결과에 대해서 논한다. 끝으로 IV절에서 본 논문을 마무리 짓는다.

II. 회로 구성

측온 저항체를 사용해서 온도차를 직접 주파수로 변환하는 회로를 그림 1에 나타냈다. Operational transconductance amplifier(OTA) 1은 R_{T1} 과 R_{T2} 의 저항차를 등가의 전류로 변환시킨다. 여기서, R_{T1} 과 R_{T2} 는 각각 온도 $T_1^{\circ}\text{C}$ 그리고, $T_2^{\circ}\text{C}$ 에 대한 RTD의 저항이다. 이 전류는 OTA2와 OTA3의 바이어스 전류로 되어 각각의 트랜스컨덕턴스를 제어한다.

OTA2와 OTA3 그리고 커패시터 C는 시뮬레이티드 인덕터(simulated inductor)를 구성하고, 이 인덕터는 다시 C_1 , C_2 와 결합해서 공진 회로를 형성한다. 따라서, 온도차는 RTD에 의해서 저항차로, 저항차는 OTA1에 의해서 등가 전류로, 등가 전류는 시뮬레이티드 인덕터에 의해서 등가 인덕턴스로, 등가 인덕턴스는 공진 회로에 의해 최종적인 측정 파라미터인 주파수로 변환된다. 이하에 회로의 동작에 대해서 상세히 설명한다.

OTA1의 출력 전류는 다음 식으로 나타내어진다.^[10]

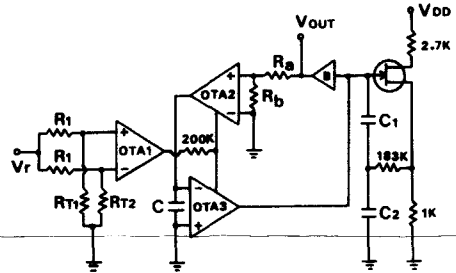


그림 1. 백금 측온 저항체 온도 센서(RTD)를 이용한 온도차-주파수 변환기 회로도

Fig. 1. The circuit diagram of temperature difference-to-frequency converter using platinum RTD.

$$I_o = gm_1 \left(\frac{R_{T1}}{R_1 + R_{T1}} - \frac{R_{T2}}{R_1 + R_{T2}} \right) V_r \quad (1)$$

여기서, gm_1 은 OTA1의 트랜스컨덕턴스이다. (1)식에서

$$R_1 \gg R_{T1}, R_{T2} \quad (2)$$

이라면,

$$I_o \approx gm_1 \frac{R_{T1} - R_{T2}}{R_1} V_r \quad (3)$$

로 근사되어, OTA1의 출력 전류가 두개의 RTD의 저항차에 직접 비례하게 된다. 이 전류는 반씩 분류되어 OTA2와 OTA3의 바이어스 전류로 된다. 따라서, 저항차와 OTA2 그리고 OTA3의 트랜스컨덕턴스와의 관계는 다음 식으로 나타내어진다.

$$gm_2 = gm_3 = p \frac{I_o}{2} = \frac{p gm_1 (R_{T1} - R_{T2})}{2R_1} V_r \quad (4)$$

여기서,

$$p = \frac{1}{2V_T} \quad (5)$$

이고, V_T 는 트랜지스터의 열전압(thermal voltage)이다. 저항차에 의해 트랜스컨덕턴스가 제어되는 OTA2와 OTA3는 저항 R_a , R_b , 완충 증폭기 B, 그리고 커패시터 C와 함께 시뮬레이티드 인덕터를 구성하고, 그 인덕턴스는 다음 식으로 주어진다.^[11]

$$L_{eg} = \frac{C}{gm_2 gm_3 \cdot m} = \frac{C}{\left(p gm_1 \frac{R_{T1} - R_{T2}}{2R_1} V_r \right) \cdot m} \quad (6)$$

여기서,

$$m = \frac{R_b}{R_a + R_b} \quad (7)$$

이다. 따라서, 변환기의 발진 주파수는

$$f_o = K(R_{T1} - R_{T2}) \quad (8)$$

로 되어, 두개의 RTD의 저항차에 직접비례하게 된다. 여기서,

$$K = \frac{p \cdot g_{m1} \cdot V_r}{4\pi R_1 \left(\frac{C_1 \cdot C_2 \cdot C}{C_1 + C_2 \cdot m} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (9)$$

이다. RTD의 온도-저항 특성은

$$R(T) = R_o(1 + \alpha T + \beta T^2) \quad (10)$$

의 2차 식으로 근사된다.^[12] 여기서, R_o (공칭저항), α , β 는 상수이고, T는 섭씨 온도이다. 두개 센서의 온도-저항 특성이 동일하다고 가정하고, (10)식을 (8)식에 대입하면, 온도차와 주파수와의 관계는 다음 식으로 나타내어진다.

$$f = K R_o [\alpha(T_1 - T_2) + \beta(T_1^2 - T_2^2)] \quad (11)$$

여기서, $|\beta/\alpha| \ll 1$ 이기 때문에, 온도차가 그다지 크지않은 범위에서는 우변 제 2 항이 무시되어, 주파수는 온도차에 직접 비례하게 된다. 변환 감도는

$$\frac{\partial f_o}{\partial \Delta T} = K R_o \alpha \quad (12)$$

로 나타내어진다.

III. 실험결과

그림 1의 회로를 개별 부품으로 구성하여, 온도 측정에 사용했다. 모든 OTA는 CA3080이고, g_{m1} 은 7 mS에 설정했다. 백금(Pt) RTD의 R_{T1} 과 R_{T2} 는 PA-50-8로, $R_o = 100 \Omega$, $\alpha = 3.9733 \times 10^{-3} / ^\circ C$, $\beta = -5.8611 \times 10^{-7} / (^\circ C)^2$ 이다. $V_r = 14V$ 였고, 다른 회로 소자는 $C = 10nF$, $C_1 = C_2 = 500pF$, $R_1 = R_a = 100 K\Omega$, $R_b = 100 \Omega$ 였다. 그림 2는 온도차가 55°C일 때의 발진 파형을 보여준다. R_{T2} 를 $96\Omega (-15^\circ C)$ 에 고정시키고 R_{T1} 을 109Ω 으로부터 $157\Omega (30^\circ C \sim 150^\circ C)$ 까지 변화시켜서 측정된 결과를 그림 3에 나타냈다. 변환 감도는 $16Hz/^\circ C$ 그리고 최대 직선 오차는 온도차 $150^\circ C$ 에서 2.15%이다. 이 직선 오차는 (11)식의 우변 제 2 항에 의해서 기인되는 것이며, ROM을 사용하여 디지털적으로 보정할 수 있다.^[13] 그림 1의 회로에서 온도 센서 R_{T1} 과 R_{T2} 를 각각의 고정 저

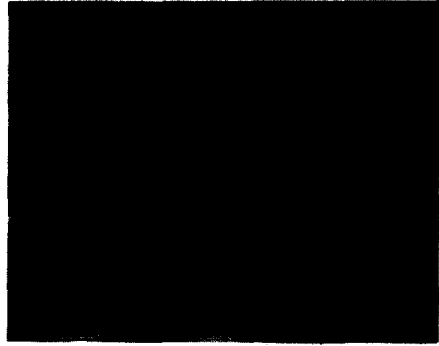


그림 2. 실험으로 관측된 발진 파형
수평 스케일 : 1msec/div
수직 스케일 : 1V/div

Fig. 2. Experimentally observed oscillation waveforms.

Horizontal scale : 1msec/div.
Vertical scale : 1V/div.

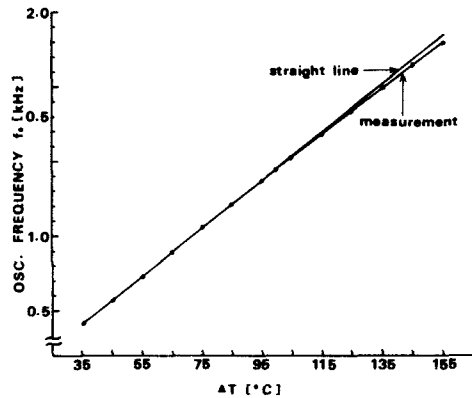


그림 3. 제안한 변환기로 얻은 발진 주파수 온도차

Fig. 3. The oscillation frequency versus temperature difference obtained by the prototype converter.

항들로 대체한후, 회로를 일정한 온도에서 몇시간씩 동작시켜 가면서, 발진기 자체의 주파수 드리프트를 측정했다. 측정되어진 드리프트는 $\pm 0.5Hz$ 였다. 따라서, 제안한 변환기로 측정할 수 있는 최소 검출 가능 온도차(minimum detectable temperature difference)는 $\pm 0.031^\circ C$ 로 평가된다.

발진기의 주파수 드리프트는, (5), (8), 그리고 (9)식에 의해, OTA의 열전압에 의존함을 알 수 있다. LM-13600(OTA with linearizing diodes)을 사용하면,

발전 주파수는 이론적으로 열전압에 무관하게 된다.¹⁴⁾ 따라서, 3080 OTA대신에 13600 OTA를 채용함으로써, 보다 낮은 주파수 드리프트와 최소 검출 가능 온도차를 얻을 수 있다.

IV. 결 론

인덕턴스 시뮬레이션에 기초를 둔 새로운 저항차 주파수 변환기에 대해서 기술했다. 개발한 변환기는 높은 온도 분해능을 갖는다. 센서를 제외한 모든 회로는 소자값을 스칼링(scaling) 함으로서 모노리틱 IC로 제조 가능하다. 값싸고, 고정도의 온도 센서로서, 개발한 변환기는 계측기기, 가전제품, 산업용 온도 콘트롤러, 의료기기등에 응용될 수 있다. 또한 제안한 회로는 스트레인 게이지(straingauge), 실리콘 압력 센스등 모든 저항형 센서의 인터페이스로서 사용될 수 있으며, 특히 소자수가 적으므로, 스마트 센서(smart sensor)의 인터페이스로서 적합하다.

參 考 文 獻

- [1] W.G. Wolber and K.D. Wise, "Sensor development in the microcomputer age," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-26, pp. 1864-1874, Dec. 1979.
- [2] J.M. Borky and K.D. Wise, "Integrated signal conditioning for silicon pressure sensors," *ibid.*, vol. ED-26, pp. 1906-1910, Dec. 1979.
- [3] E. Habekotte and S. Cserveny, "A smart digital-readout circuit for a capacitive microtransducer," *IEEE Micro*, pp. 44-54, Oct. 1984.
- [4] K. Watanabe and W.-S. Chung, "A switched-capacitor interface for intelligent capacitive transducers," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-35, pp. 472-476, Dec. 1986.
- [5] 片岡, 柴田, 高橋, 山崎, "センサハンドブック," 培風館, 1986.
- [6] 이덕동, 최동한, 손병기, "도시가스 센서의 개발," "전자공학회논문지, 제25권, 제4호, pp. 52-61, 1988.
- [7] W.-S. Chung and K. Watanabe, "A linear temperature-to-frequency converter using an integrable Colpitts oscillator," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-34, pp. 534-537, Dec. 1985.
- [8] B. Sundqvist, "Simple, wide-range, linear temperature-to-frequency converters using standard thermistors," *J. Phys. E. Sci. Instrum.*, vol. 16, pp. 261-264, 1983.
- [9] C.D. Jonson and H.A. Richeh, "Highly accurate resistance deviation to frequency converter with programmable sensitivity and resolution," *IEEE Trans. Instrum and Meas.*, vol. IM-35, pp. 178-181, June 1986.
- [10] A.B. Grebene, "Bipolar and MOS Analog Integrated Circuit Design," CH. 7, John Wiley and Sons, 1984.
- [11] Won Sup Chung and K. Watanabe, "Active-RC-circuit synthesis for the simulation of a grounded inductor," *Electronics Letters*, vol. 20, no. 14, pp. 610-612, July 1984.
- [12] F.N. Trofimekoff and A.E. Nordquist, "Single amplifier resistance bridge with feedback linearization," *IEEE Trans. Instrum and Meas.*, vol. IM-33, pp. 60-63 March 1984.
- [13] 이문기, "마이크로 컴퓨터 응용 계측회로," 기술연구소 1986.
- [14] National Semiconductor, "Linear Data-book."*

著 者 紹 介

鄭元燮 (正會員) 第25卷 第11號 參照
현재 청주대학교 반도체공학과 조교수

金弘培 (正會員) 第25卷 第11號 參照
현재 청주대학교 반도체공학과 부교수