

가변저항이 없는 고정밀 Programmable T/C 신호변환기의 구현

이성희, 이진희, 박태준, 목임수
포항산업과학연구원

Implementation of High Precision Programmable T/C Signal Converter Without Variable-Resistance

Seunghee Lee, Jinhee Lee, Taejun Park, Imsoo Mok
Research Institute of Industrial Science and Technology

Abstract - In this paper, a novel Programmable Signal Conditioner(PSC) for Thermo Couple(T/C) without variable-resistance is proposed. It is fabricated by using a fully digitalized error-correction and calibration algorithm. In signal processing of T/C, since the output voltage of T/C is nonlinear and its level is very low, the circuitry become very complicated to reduce the converting error and identify the true thermal voltage signal. The newly proposed PSC has compensation and calibration algorithm not using variable resistor. Moreover structure can be very simple and it has highly precise output characteristics.

1. 서 론

제어, 계측기기가 점점 복잡해지고 정교해짐에 따라 더욱 정밀한 온도측정이 요구되고 있다. 그러나 현재 산업용 제어기에 널리 사용되고 있는 T/C(Thermo Couple) 신호 변환기는 여러 가지 문제점을 안고 있다. T/C의 열기전력을 증폭시켜서 온도값으로 변환하는 이 온도계는, 수 100 ℃ 이하의 저온에서 1000 ℃ 이상의 고온까지 측정이 가능하나, T/C의 기전력값이 온도값에 선형적이지 않고, 5/100 mV/℃ 미만의 아주 낮은 기전력을 가져, 미약한 기전력 변환 오차가 아주 큰 온도 변환 오차를 발생시키므로 T/C의 발생 기전력을 정확한 온도값으로 변환시키는데에는 상당히 정밀하고 복잡한 구조의 회로가 요구된다. 일반적으로 가변저항이 사용되는 이득 가변 증폭회로를 구성하고 증폭률을 정확히 교정한후 이에따른 출력을 온도값으로 계산해내는 방법을 사용한다. 그런데 가변저항은 먼지 및 습기에 약하고, 시간이 지남에 따라 노화로 인하여 저항값이 변화되므로, T/C 신호 변환기의 정밀도를 유지하기 위하여 일정 기간마다 증폭률의 보정이 요구된다. 또한 증폭회로에 있어서 증폭률 조정은 간단하게 이루어지나 오프셋 에러(offset error)를 제거하는데에는 상당히 어려움이 따른다.

본 논문에서는 T/C 기전력값을 온도값으로 변환하는데 발생하는 문제점들을 분석하고, 이들을 해결하기 위한 새로운 방식의 T/C 신호변환기 구조를 제안한다. 그리고 제안한 T/C 신호 변환기의 구현을 통하여 정밀도 및 신뢰성을 검증한다.

2. 본 론

2.1 고정밀 T/C 신호변환기의 기본 구조

T/C의 발생 기전력은 온도에 비선형적이어서 기전력으로 부터 온도값을 계산하는데에는 다차원 근사 함수나 기전력-온도 도표가 이용된다. 함수나 도표에 의한 계산을 위해서는 디지털 프러세서가 동원되는데, T/C의 기전력은 크기가 미약하기 때문에 일정 비율로 증폭된후 디지털 값으로 변환된다. 이러한 이유 때문에 고정밀 온도계로 이용되는 T/C 신호변환기의 기본 구조는 그림 1과 같다. T/C의 기전력을 일정한 비율로 증폭시킨후 A/D를 통하여 디지털 값으로 변환하여 T/C의 발생 기전력을 환산해 내면 정확한 발생기전력을 얻을 수 있고, 이에따라 정확한 온도값을 계산해낼수 있다.

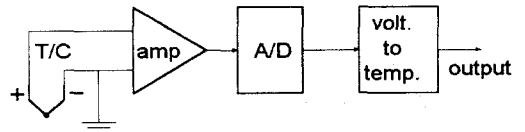


그림 1 T/C 신호 변환기의 기본 구조

증폭은 보통 오프셋 전압이 적고, 온도에 대한 드리프트(drift)가 적은 고가의 op-amp가 이용되고, 주변 수동 소자들도 허용 오차가 아주 작아야 한다. 그러나 아주 고가의 고급 op-amp라 할지라도 크기는 차이가 있지만 오프셋 전압은 반드시 존재한다. 각 op-amp 제조사의 데이터 시트에 의하면 0.03mV에서 10mV까지의 입력 오프셋 전압을 가지며, 같은 op-amp라도 오프셋 전압의 크기는 10배 정도의 차이를 가지는 것으로 나타나 있다.

그림 2는 일반적으로 많이 사용하는 op-amp의 반전 증폭회로이다. 이때, 증폭률은 $-R_2/R_1$ 이다. T/C의 열

기전력은 아주 미약하기 때문에 A/D변환기의 입력으로 사용하기 위해서는 적어도 100 이상의 증폭률을 가지도록 해야한다. 그런데, 모든 op-amp는 그림 2에서 보인 바와 같이 입력측에 오프셋 전압을 가지며, 증폭률이 클수록 오프셋 전압의 영향이 커진다. 또한 증폭률을 결정하는 저항 R₁과 R₂도 조금의 오차를 가져 원하는 증폭률을 얻기는 힘들다. 오프셋 전압의 영향을 제거하기 위해서는 일차적으로 고가의 op-amp에다 부가적인 오프셋 제거 회로가 필요하고, 증폭률을 정확히 맞추기 위해서는 R₁ 또는 R₂에 가변저항 소자가 추가되어야 한다. 이렇게 되면 회로가 복잡해지고 사용 소자의 갯수가 많아짐에 따라 온도의 변화에 따른 드리프트가 커질수 있다.

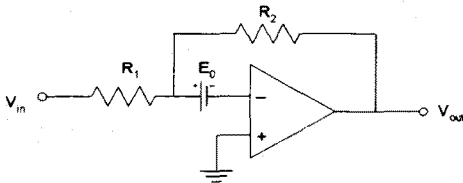


그림 2 op-amp의 입력 오프셋 전압

2.2 증폭기 에러 보정

그림 3은 증폭률 오차와 오프셋 오차를 가지는 증폭기를 사용하고 이를 보정하는 과정을 도식한 것이다. 그림에서는 범용으로 사용되는 증폭기 op-07과 A/D 변환기 max191과 같은 증폭기를 사용한 경우 실제 발생된 에러값이 나타나는데, k-type T/C의 경우 40℃에서 1.611mV의 기전력이 발생되는데 100배의 이득을 가지는 증폭단을 거친후 A/D변환한 결과를 계산에 의해 역산한 T/C 발생 기전력은 1.782mV이다. 그림에서 'mV_digital'은 A/D 변환된값을 전압값으로 계산한 것을 의미한다. 증폭률의 오차로 인해 측정된 T/C의 기전력이 1mV차이가 나면 계산 온도는 약 20℃ 정도의 차이를 가진다. 이를 보정하기 위해서는 오프셋 전압의 영향을 완전히 제거한 후 증폭률을 정확한 비율을 가지도록 보정을 해야한다.

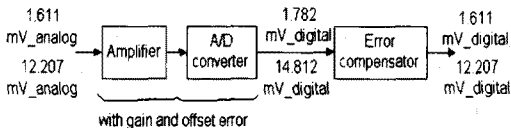


그림 3 op-amp의 이득 및 오프셋 에러 보정 방법

그림 3에서 에러 보정부는, 전단에 위치한 증폭기 및 A/D 변환기의 특성을 수식으로 함수화하고 이의 역함수로 구성된다. 에러 보정기를 통한 신호는 증폭기에 입력된 정확한 기전력 값을 나타낼수 있다. 에러 보정은 소프트웨어로 구현되며 연산에 의해 수행된다.

연산에 의한 증폭기 에러를 보정하는 방법을 수식으로 설명하면 다음과 같다. T/C 에 연결된 증폭회로는 대략적으로 설정된 이득만 가지게 한 상태에서, 임의의 두 입력에 대한 증폭 변환값과 이 두 입력의 실제값을 알아낸다. 증폭기를 통한 신호는 증폭기가 가지는 오프셋과 증폭률에 따라 출력을 낸다. 임의의 두 입력에 대한 두 동일 증폭 변환기의 출력은 식 (1) 및 (2)와 같이 표현된다. 이 네개의 값을 이용하여 T/C에서 발생하는 실제적인 기전력을 알아내기 위해 필요한 상수인 Gain과 Offset은 식 (3) 및 (4)를 통해서 구해진다.

$$V_{IL} = V_{OL} \times \text{Gain} + \text{Offset} \quad (1)$$

$$V_{IH} = V_{OH} \times \text{Gain} + \text{Offset} \quad (2)$$

$$\text{Gain} = \frac{V_{OH} - V_{OL}}{V_{IH} - V_{IL}} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{Offset} &= V_{OL} - V_{IL} \cdot \text{Gain} \\ &\approx V_{OH} - V_{IH} \cdot \text{Gain} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 V_{OH}와 V_{OL}는 온도-기전력 도표에서 찾은 이상적인 발생 기전력값, 즉 증폭기에 실제로 입력된값이고, 보정기를 통하여 출력되기를 원하는 값이다. V_{IH}와 V_{IL}는 실제로 증폭 변환된 기전력 값을 나타낸다. 그리고 식 (4)의 근사 등호는 연산오차를 나타낸다. 이와 같이 구해진 Gain 값과 Offset 값을 이용하여 실제 발생 기전력은 수식 (5)을 이용하여 구한다.

$$V_C = V_I \cdot \text{Gain} + \text{Offset} \quad (5)$$

여기서 V_I는 증폭 변환된 입력값이고 V_C는 보정된 출력값이다.

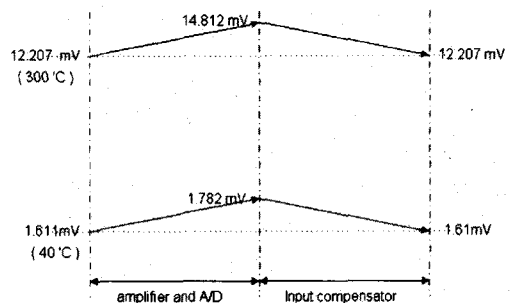


그림 4 이득 및 오프셋 에러의 발생 및 보정 도식

그림 4는 40℃와 300℃에서 T/C의 출력을 증폭 변환하고 보정하는 과정을 그래프로 표현한 것이다. 이 그림에서 보인 보정기의 삼입을 통하여 미약한 입력신호를 정확히 알아내는 것을 볼수있다.

Gain값과 Offset값은 신호변환기 제작시 값을 구하여 내부 메모리에 저장되어 사용된다. 신호변환기 내부의 회로 소자가 교체되는 경우, 재 설정이 필요하나 특별한 경우가 아니면 재설정하지 않아도 정밀도는 유지된다. 이 신호변환기 구조에서는 가변저항이 사용되지 않으므로 완벽한 증폭기 에러 보정과 함께 열악한 환경에서의 신뢰성도 함께 보장된다.

2.3. 실험 및 결과

실험을 위해 구현된 신호변환기의 구조는 그림 5와 같다. T/C는 k-type을 사용하였고, Program Unit으로 전용 프로그램이 탑재된 NoteBook PC를 사용하였다. 상온 보상은 온도 센서용 diode를 사용하고 측정값의 보정은 정밀한 항온조내에서 행하였다. T/C 신호 처리부의 보정은 본 논문에서 제안한 방법에 따라 0.25℃의 정밀도를 가지는 표준신호발생기(YEW2553)를 입력으로 이용하고, Program Unit을 연결하여 gain값과 offset값을 구한후 신호변환기에 저장하였다.

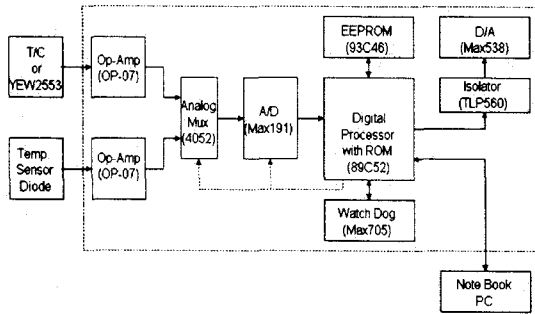


그림 5 실험 신호변환기 구조

보정이 이루어진후 온도를 10℃ 간격으로 상승시키면서 신호변환 모듈의 측정 결과가 표 1과 같다. 이 결과를 보면 0.05℃의 분해능과 충분한 정밀도를 확인할 수 있다. 실험에는 두 개의 신호변환기가 사용되었고, 측정 결과는 입력 온도와 약간의 오차를 가지는데, 이는 신호발생기의 오차와 신호변환기의 연산오차(truncation error)의 영향이라 판단된다.

표 1 신호변환기 실험 결과

YEW2553(℃)	Converter A(℃)	Converter B(℃)
50.0	50.03	50.72
60.0	60.31	60.62
70.0	70.33	70.68
80.0	80.29	80.91
90.0	90.55	90.78
100.0	100.47	100.83
120.0	1120.38	120.82
140.0	140.31	140.48
160.0	160.18	160.28

YEW2553(℃)	Converter A(℃)	Converter B(℃)
180.0	180.00	180.18
200.0	200.15	199.22
220.0	220.04	220.20
240.0	240.19	240.20
260.0	260.38	260.22
280.0	280.58	280.33
300.0	300.94	300.64

4. 결 론

본 논문에서는, T/C의 열기전력을 이용하여 온도를 측정하는 T/C 신호변환기에 있어서 정밀도를 유지하기 위해 요구되는 문제점을 분석하고, 이를 바탕으로 개선된 구조의 T/C신호변환기를 제안한다. T/C의 온도에 대한 발생 기전력의 크기는 비선형인데다 아주 미약하여, 온도값으로 변환하는데 상당히 정밀하고 복잡한 증폭 및 변환과정이 요구되는데, 제안된 T/C 신호변환기는 간단한 구조의 증폭회로와 디지털 방식 증폭 및 변환 에러 보정 알고리즘의 적용으로 단순하면서 고정밀도를 가진다. 제안된 구조의 T/C 신호변환기는 구현 및 실험을 통하여 신뢰성 및 정밀도를 확인하였다.

제안된 T/C 신호변환기는, 보정을 위하여 사용되는 가변저항을 제거하여 회로를 단순화시켰고 제작이 용이하며, 기존의 고가형 정밀 T/C 신호변환기와 비교하였을 때 정밀도 및 분해능을 유지하면서 신뢰성 및 내구성이 우수한 장점을 가지고 있다. 또한 full-digital 방식이므로 다양한 형태의 제품군에 응용하기가 용이하다.

[참고 문헌]

- [1]Mahana,P.N. "Transducer Output Signal Processing Using an Eight-Bit Microcomputer", IEEE Trans. IM-35 No.2, pp.182-186, 1986
- [2]Malcovati,P. "Smart Sensor Interface with A/D Conversion and Programmable Calibration", IEEE Journal of Solid State Circuit,Vol.29, No.8, pp.963-966, 1994
- [3]Crary,S.B., "Digital Compensation of High Performance Silicon Pressure Transducer", Sensors and Actuators A21-23, pp.70-72, 1987
- [4]Gert van der Horn, Khalid Lyahou and Johan Huijsing, "Calibration and Linearization Method for Microcontroller-based Sensor Systems", Journal of Measurement and Control, VOL.29, pp.270-273, 1996
- [5]이성희,이창환, "개선된 Programmable Thermo-Couple Signal Conditioner의 구현", RIST 연구논문, VOL.10 No.4, pp.412-416, 1996
- [6]송승우,오연식,유종선,안재봉, "PLC에서의 온도제어 시스템 구현", 전기학회학술대회 논문집, pp1063-1065, 1996