

다양한 열전쌍(TC)의 냉점보상과 단선감지 회로설계 및 이를 이용한 다채널 인터페이스 구현

Design of Cold-junction Compensation and Disconnection Detection Circuits of Various Thermocouples(TC) and Implementation of Multi-channel Interfaces using Them

차 형 우[★]

Hyeong-Woo Cha[★]

Abstract

Cold-junction correction(CJC) and disconnection detection circuit design of various thermocouples(TC) and multi-channel TC interface circuit using them were designed. The CJC and disconnection detection circuit consists of a CJC semiconductor device, an instrumentation amplifier(IA), two resistors and a diode for disconnection detection. Based on the basic circuit, a multi-channel interface circuit was also implemented. The CJC was implemented using compensation semiconductor and IA, and disconnection detection was detected by using two resistor and a diode so that IA input voltage became $-0.42V$. As a result of the experiment using R-type TC, the error of the designed circuit was reduced from $0.14mV$ to $3\mu V$ after CJC in the temperature range of $0^{\circ}C$ to $1400^{\circ}C$. In addition, it was confirmed that the output voltage of IA was saturated from $88mV$ to $-14.2V$ when TC was disconnected from normal. The output voltage of the designed circuit was $0V$ to $10V$ in the temperature range of $0^{\circ}C$ to $1400^{\circ}C$. The results of the 4-channel interface experiment using R-type TC were almost identical to the CJC and disconnection detection results for each channel. The implemented multi-channel interface has a feature that can be applied equally to E, J, K, T, R, and S-type TCs by changing the terminals of CJC semiconductor devices and adjusting the IA gain.

요 약

다양한 열전쌍(TC)의 냉점보정(CJC)과 단선 감지 회로설계와 이를 이용한 다채널 TC 인터페이스 회로를 설계하였다. 냉점보정(CJC)과 단선 감지 기능 회로는 열전쌍, CJC 반도체 소자, 계측 증폭기(IA), 단선 감지용 저항 2개와 하나의 다이오드로 구성된다. 이 기본 회로를 바탕으로 다채널 인터페이스 회로도 구현하였다. CJC는 보상 전용 반도체와 IA를 사용하여 구현하였고, 단선감지는 2개의 저항과 하나의 다이오드를 사용하여 IA 입력전압이 $-0.42V$ 가 되도록 하여 검출하였다. R-형 TC를 사용하여 실험한 결과 설계한 회로는 $0^{\circ}C \sim 1400^{\circ}C$ 의 온도범위에서 냉점보정 후 오차가 $0.14mV$ 에서 $3\mu V$ 로 감소되었다. 또한, TC가 정상에서 단선인 경우 IA의 출력전압이 $88mV$ 에서 $-0.42V$ 로 포화된 것을 확인하였다. $0^{\circ}C \sim 1400^{\circ}C$ 의 온도 범위에서 설계한 회로의 출력전압은 $0V \sim 10V$ 이었다. R-형 TC를 사용하여 4-채널 인터페이스를 실험한 결과에서도 각 채널에 CJC와 단선 감지 결과와 거의 동일하였다. 구현한 다채널 인터페이스는 CJC 반도체 소자의 단자의 변경과 IA의 이득을 조절하면 E, J, K, T, R, S-형 TC에도 동일하게 적용할 수 있는 특징을 갖는다.

Key words : R-type thermocouple(TC), cold junction compensation(CJC), TC disconnection detection, multi-channel interface circuit, sensor interface

* Department of Electronics Eng., Cheongju University, Korea

★ Corresponding author

E-mail : hwcha@cju.ac.kr, Tel : +82-43-229-8441

Manuscript received Feb. 10, 2023; revised Feb. 23, 2023; accepted Feb. 24, 2023.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

고온 고정도 열처리 장치들이 반도체 산업, 신소재 산업, 그리고 MEMS 산업을 중심으로 급증하고 있다. 이러한 열처리 장치에서는 일정한 화학공정처리 공간(예, 300mm 웨이퍼 산화 및 증착 공정)의 온도를 일정하게 유지와 이상 유무(단선, 단락) 검증하는 온도 제어기가 중요하다.

국내에서도 다양한 반도체 제조 장비 국산화가 활발하게 이루어지고 있지만, 전기로(furnace)의 경우 고온 히터(heater)와 온도 컨트롤러는 수입하여 전체 전기로의 국산화를 하고 있다. 300mm 웨이퍼(wafer)용 전기로의 온도 제어의 경우 지름이 400mm, 높이가 1.5m의 석영 튜브(tube) 내의 온도가 0°C~1400°C 범위에서 설정된 온도를 일정하게 제어하는 기술이 필요하다. 이 경우 튜브 내를 4개 구역(zone)으로 나누어 열전쌍(thermocouple : TC) 온도센서를 사용하여 정밀 온도 제어를 하고 있다.

다양한 열전쌍(TC)들의 온도 변화에 따라 생성되는 전압 특성을 그림 1에 제시하였다. 이 그림으로부터 측정 온도 범위가 0°C~1400°C에 대해서는 R, S, B형의 TC를 사용해야 한다는 것을 알 수 있다. 모든 TC들은 0°C를 기준으로 하여 임의의 온도에 대한 전압을 발생하는 온도 센서이기 때문에 실온(25°C)에 대한 냉점(cold junction)인 0°C에 대한 기전력을 보정해야 한다^[1].

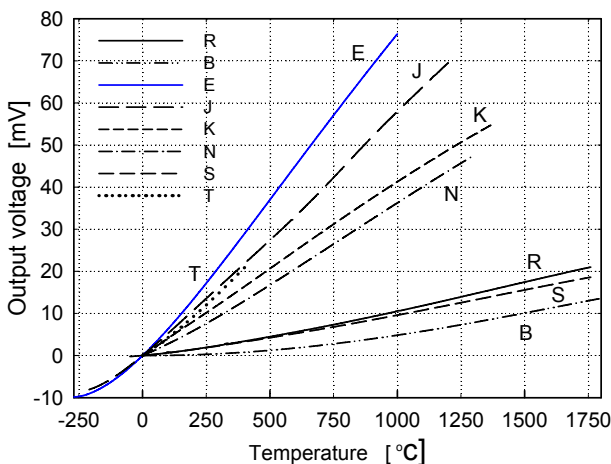


Fig. 1. Voltage characteristics generated according to temperature for each type of TC.

그림 1. TC의 종류별 온도에 따라 생성되는 전압 특성

원시적인 냉점보정 방법은 그림 2에서 제시한 바와 같이 얼음(ice water)를 이용하여 TC1은 외부(측정하고자

하는 환경)에 TC2는 얼음 속에 넣어서 기전력을 측정하는 방법이다. 이 경우 측정시스템의 복잡하고, 큰 외형을 가지며, 특히 얼음의 공급이 어려운 상황이기 때문에 현실적으로 적용이 어렵다. 이러한 문제는 최근에 영점보정 반도체 칩을 사용하여 해결하고 있다^[11-13].

또한, TC가 고온에서 장시간 사용하면 열화작용에 의해 단선(open) 되기 때문에 열처리 장치의 신속한 관리 유지를 위하여 TC의 단선을 검출하는 기능이 반드시 있어야 한다. 일반적으로 반도체공정에서 사용되는 전기로는 4개 이상의 다채널 TC를 사용하기 때문에 고성능 마이크로프로세서를 사용하여 온도 측정과 단선 확인은 물론 TC의 선형화를 프로그램 코딩으로 처리하면 된다.

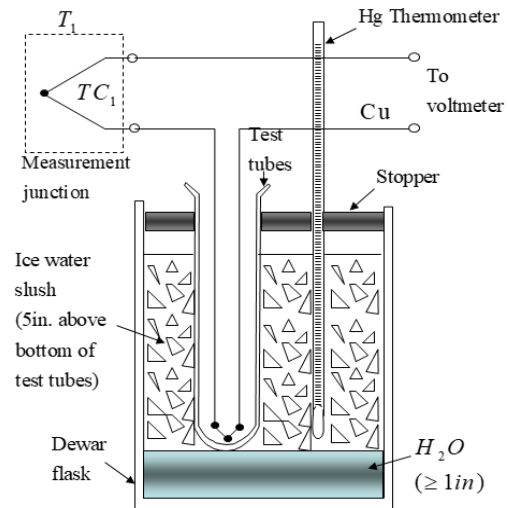


Fig. 2. Physical coolness correction principle of TC.

그림 2. TC의 물리적인 냉점 보정 원리

본 연구 전에는 300mm 이상 웨이퍼용 전기로의 온도 컨트롤러의 국산화를 위하여 R-형 TC 센서의 냉점보정과 단선(open) 감지 회로를 발표하였다^[4]. 이 논문에선 다양한 TC에 대한 적용 여부를 확인하지 못하였고 R-형 TC에 대하여 다채널 적용이 가능하다는 것을 제시하였다. 이후, 마이크로칩(Microchip)사에서 다양한 TC(예: K, J, T, N, S, E, B, R형)를 사용할수 있는 전용 칩을 개발하여 온도-디지털신호 변환 모듈로 만들어 상용화를 하고 있다^{[6]-[8]}. 이 경우, 1°C 통신으로 다채널, 다양한 TC의 신호처리를 할 수 있었다. 그러나 이 경우 사용하는 TC의 수량에 따라, 변환 모듈이 필요하고, 단선을 검출하기 위해 추가적인 회로가 필요한 문제점이 있다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 개선하고 냉점보정과 단선(open) 감지가 R-형 TC 센서뿐만 아니라 E, J, K, T, 그리고 S-형 TC에도 적용이 가능함을 검토하고 보

완 설계를 한다. 또한, 설계한 회로를 바탕으로 다채널(n개의 TC 사용)까지 사용할 수 있는 냉정보정 및 단선 검출 인터페이스를 설계 및 그 성능을 분석한다.

II. 회로구성 및 동작원리

1. TC의 동작특성

그림 3에 나타낸 바와 같이 TC는 두 개의 서로 다른 물질을 접합시킨 다음, 온도차를 주면 씨드백 효과(Seeback effect)에 의해 기전력이 발생하는 소자로서, 기전력은 냉점(cold junction)인 0°C와 임의의 온도차에 비례하여 발생한다. TC의 기전력은 다음과 같은 식으로 주어진다^[3].

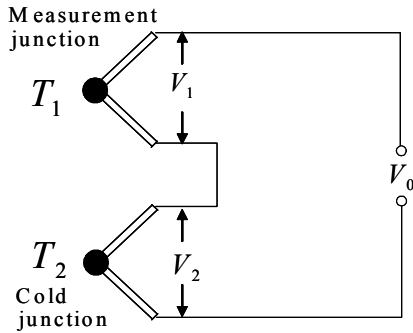


Fig. 3. Principle diagram of voltage generation in TC.
그림 3. TC의 전압 생성 원리도

$$V_o = V_1 + V_2 = \alpha(T_1 - T_2) + \gamma(T_1^2 - T_2^2) \quad (1)$$

여기서, α 와 γ 는 접합 물질에 의해 주어지는 상수이고 T_1 과 T_2 는 V_1 과 V_2 에 대한 각각의 온도이다. 그림 3과 식 (1)에서 $T_2 = 0^\circ\text{C}$ 로 만들어 준다면 $V_2 = 0\text{V}$ 가 되며, 식 (1)은 $V_o = V_1 = \alpha T_1 + \gamma T_1^2$ 로 주어진다 것을 알 수 있다. 또한, 실온(20°C)에서는 $T_1 = T_2$ 가 되어 $V_o = 0$ 가 되어 TC 센서로 실온을 측정할 수 없다. 따라서 실온에 대한 TC의 전압 보정 즉, V_2 가 0V가 되도록 냉점보정(cold-junction compensation : CJC)를 해 주어야만 된다.

TC는 접합시키는 물질에 따라 측정할 수 있는 온도범위, 기전력의 크기, 그리고 선형 특성의 차이가 있다. 전 기로의 경우 항상 대기 상태(standby)와 공정시간이 반복되기 때문에 TC의 일반적으로 R-형 TC를 사용하고 있다. R-형 TC는 $0^\circ\text{C} \sim 1400^\circ\text{C}$ 에서 $0\text{mV} \sim 16.04\text{mV}$ 의 기전력을 발생하고 있으며 $11.457\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 의 온도 감도를 갖고 있다.

2. 냉점보정(CJC) 반도체 소자의 동작 원리

그림 4에 TC 냉점보정(CJC) 반도체 소자(LT- 1025)의 핀 명칭(a)과 내부 블록도(b)를 나타냈다. 이 칩은 4개의 출력 $60.9\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (E형 TC), $51.7\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (J형 TC), $40.6\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (K와 T형 TC), 그리고 $6\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (R과 S형 TC)을 가지고 있다^[5]. 내부 블록은 $10\text{mV}/^\circ\text{C}$ 의 감도를 갖는 온도센서, 냉점보정 전압(bow correction voltage), 증폭기(buffer), 그리고 TC별 온도 감도(기울기) 조정 저항으로 구성되어 있다.

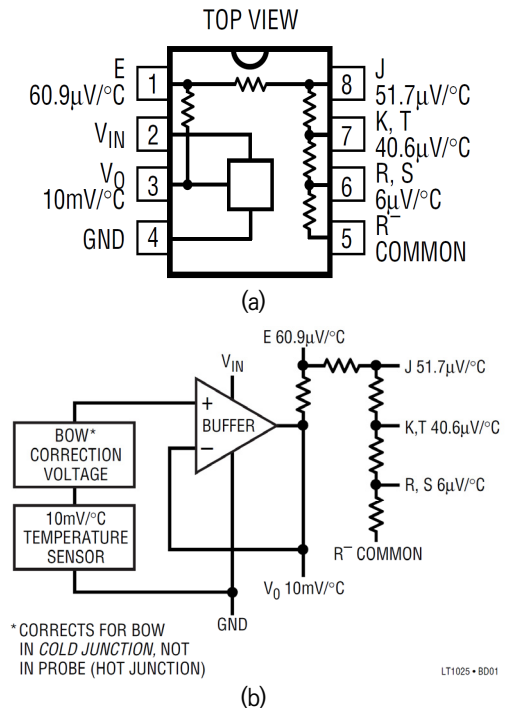


Fig. 4. Pin name (a) and internal block diagram (b) of TC's CJC semiconductor chip (LT1025).
그림 4. TC 냉점보정 반도체 칩(LT1025)의 핀 명칭(a)과 내부 블록도(b)

3. 종래의 K형 TC 냉점보정 인터페이스 회로

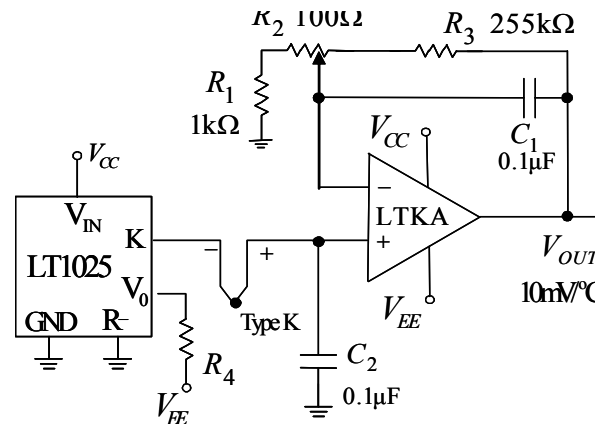


Fig. 5. Schematic of conventional K-Type TC interface^[5].
그림 5. 종래의 K-형 열전쌍 인터페이스^[5]

그림 5에 종래의 K-형 TC의 냉점보정 회로를 그림 5에 나타냈다^[5]. 회로는 냉점보정 소자 LT1025, K형 TC, 전압 증폭기로 구성되었다[4]. 이 회로는 온도에 따라 출력전압이 10mV/°C의 감도를 갖고 있지만, TC가 단선되었을 경우 출력전압이 0V가 되기 때문에 실제 0°C에 대한 TC의 출력인지 또는 단선된 경우인지 구분을 할 수 없는 문제점이 있다. 특히, R-형 TC에 대한 보상회로는 발표된 바가 없고 단선감지회로 역시 발표된 바 없었다.

4. 다양한 TC의 냉점보상 및 단선감지 회로 및 다채널 응용 회로 설계

가. 다양한 TC의 냉점보상 및 단선감지 회로 설계

다양한 TC에 대한 냉점보상과 TC의 단선을 검출하는 회로를 설계하였고 설계한 회로를 그림 6에 나타냈다. 이 회로는 1) 냉점보정 소자 LT1025, R-형 TC, 이득조정 저항기 R_G 와 계측 증폭기(instrument amplifier : IA)가 냉점 보상을 하고, 2) R_1, R_2, D_1 , 그리고 IA으로 구성된 회로는 단선을 검출한다.

냉점보정 원리는 다음과 같다. 즉, 식 (1)에서 TC 기전력 특성에서 1차항만 고려하면 R-형 TC 센서가 실온 조건의 경우 기전력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{TC}(R) = \alpha(T_P - T_{ROOM}) + \alpha T_{CJC} \tag{2}$$

$$= \alpha T_P - \alpha T_{ROOM} + \alpha T_{CJC}$$

여기서, T_P 는 TC 센서가 온도를 측정할 임의 공간의 온도(전기로의 경우 석영 튜브 내의 온도), T_{ROOM} 는 실온, T_{CJC} 는 냉점보정 온도를 의미한다.

일반적으로 임의 공간은 실온에 해당되는 온도를 갖고 있기 때문에, 실온에서 $T_P = T_{ROOM}$ 이 설립되기 때문에 TC 센서의 기전력은 0V가 나온다. 그러나 TC는 0°C를 기준으로 임의의 온도차에 대한 기전력을 발생하기 때문에 실온에 해당되는 기전력 αT_{CJC} 을 더해 주어야 한다. 즉, $-\alpha T_{ROOM} + \alpha T_{CJC} = 0$ 이 되게 한다, 따라서, 그림 6의 회로에서 R_2 가 매우 크다면 이 저항기를 개방 상태로 볼 수 있기 때문에 $V_{IN} = \alpha T_P$ 이 되어 R형 TC의 특성표(characteristic table) 값과 같은 기전력을 얻을 수 있다. 이 기전력은 계측 증폭기(AD620)의 입력이 되므로, 냉점보정 회로의 최종 출력 전압 V_{OLA} 은 다음과 같이 주어진다^[10].

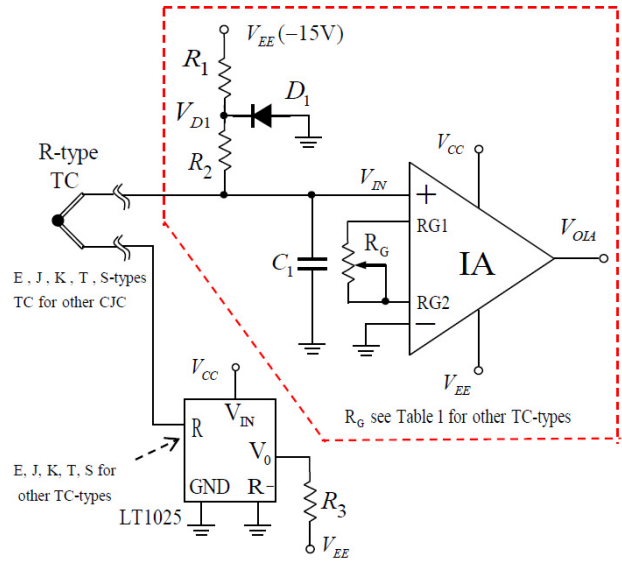


Fig. 6. Cold-junction compensation and disconnection detection circuit diagram of various TCs^[4].
그림 6. 다양한 TC의 냉점보정 및 단선 검출 회로도^[4]

$$V_{OLA} = \left(\frac{49.4k}{R_G} + 1 \right) \alpha T_P \tag{3}$$

온도가 0°C~1400°C의 범위에서 R형 TC의 경우 기전력은 0mV~16.04mV이기 때문에 이 전압을 0V~10V의 출력 전압을 얻기 위해서는 위 식을 이용하면 $R_G = 79.4\Omega$ (이득이 623.44)을 사용하면 되고, 0V~5V의 출력을 얻기 위해서는 $R_G = 158.84\Omega$ (이득이 311.72)를 사용하면 된다.

그림 6에 제시한 TC의 냉점보정 및 단선검출 회로도에서는 R-형 TC를 대상으로 하여 LT1025 칩의 R(6번 핀)을 사용하였지만, 그림 4에 나타난 LT1025 칩의 E(1번 핀), J(8번 핀), K와 T(7번 핀), 그리고 S(6번 핀) 단자를 사용하고 E, J, K, T, 그리고 S-형 TC를 사용하면 각각의 TC에 대한 냉점보정과 동시에 단선 검출을 할 수 있다. 즉, 그림 6에 나타낸 바와 같이 다른 TC를 사용할 경우, 점선으로 표기한 회로에서 계측 증폭기의 이득을 조절하는 R_G 값을 변경해야 하고 해당 TC에 대하여 LT1025 칩의 단자를 사용하면 된다.

TC들의 온도에 대한 감도와 실온(25°C)에 대한 기전력이 다르기 때문에 계측 증폭기의 이득을 별도로 각각 조정해야 한다. 다양한 TC에 대하여, 계측 증폭기의 출력 0~10V를 얻기 위한 TC별 측정온도 범위와 기전력 범위, 계측 증폭기의 이득, 그리고 R_G 값을 표 1에 제시하였다.

Table 1. Measuring temperature range and output voltage of TCs, gain of the instrumentation amplifier(IA), and R_G of IA for each TC to obtain the output voltage of 0~10V of IA.

표 1. 계측증폭기(IA)의 출력 0~10V를 얻기 위한 TC별 측정온도 범위, IA의 이득, 그리고 R_G 값

TC type	Temperature range[°C] ^[6]	Output voltage of TC [mV] ^[6]	Gain of IA	R_G [Ω]
E	0~1,000	0~76.37	130.09	382.68
J	0~1,200	0~69.55	143.78	345.98
K	0~1,350	0~54.82	182.41	272.31
T	0~400	0~20.87	479.16	103.31
S	0~1,760	0~18.61	537.34	92.11

나. TC 단선 감지 회로 동작원리

TC가 단선이 되었을 경우에는 그림 6의 회로를 그림 7와 같이 변형할 수 있다^[4]. 회로에서 $-15V(V_{EE})$, R_1 , D_1 , 그리고 접지를 통해 D_1 이 순방향이 되어 $V_{D1} \approx -0.6V$ (다이오드의 순방향 전압)가 된다. TC가 단선이 되면 C_1 에 축적된 $V_{IN} = aT_P$ 의 전압이 R_1 , R_2 를 통해 $-0.6V$ 로 방전하기 때문에 V_{IN} 은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$V_{IN} = aT_P - \frac{(aT_P + V_{D1})}{C_1(R_1 + R_2)}t \quad (4)$$

이 식에서 시간 t 가 시정수 $C_1(R_1 + R_2)$ 와 같게 되는 시간이 되면 $V_{IN} \approx -V_D$ 가 된다는 것을 알수 있다. R-형 TC의 경우 αT_P 의 최대값이 16 mV정도이기 때문에 V_{IN} 은 $-0.6V$ 에 가까운 값을 가질 것이다. 이 전압

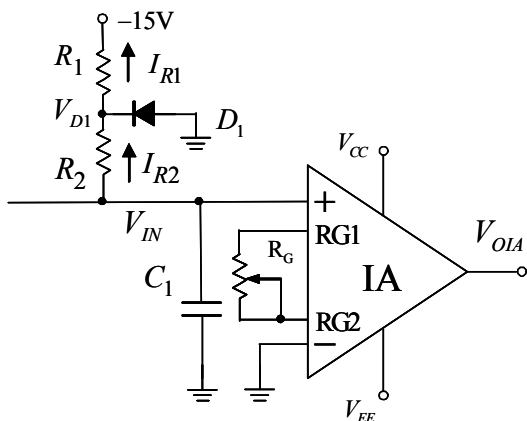


Fig. 7. Circuit diagram explaining the TC open detection principle.

그림 7. TC 단선(open) 검출 원리를 설명하는 회로도

은 계측 증폭기 IA에 의해 부(-)의 포화전압으로 변환된다. 따라서, TC의 온도변화 값이 양(+)의 전압으로 변환되기 때문에 계측 증폭기 출력전압이 양(+) 전압에서 부(-)의 포화전압으로 변환될 때 TC의 단선으로 판단할 수 있다. 즉, 계측증폭기의 출력 V_{OIA} 이 부(-)의 포화전압이면 TC가 단선된 것으로 볼 수 있다. 따라서, 그림 7의 회로를 사용하면 다양한 TC, 즉 E, J, K, T, 그리고 S-형 TC의 단선 검출을 할 수 있다. 단, 계측증폭기의 이득 조정 저항 R_G 의 값은 TC에 따라 표 1과 같이 조정하여야 한다.

다. 다채널, 다양한 TC 냉점보정과 단선감지 인터페이스 회로설계

그림 6에 나타난 다양한 TC의 냉점보정(CJO)과 TC의 단선 검출회로를 바탕으로 다양한 TC에 대하여 다채널 TC의 냉점보정 및 단선 검출을 설계할 수 있으며, 다채널 R-형 TC 또는 E, J, K, T, S-형 TC에 적용 가능한

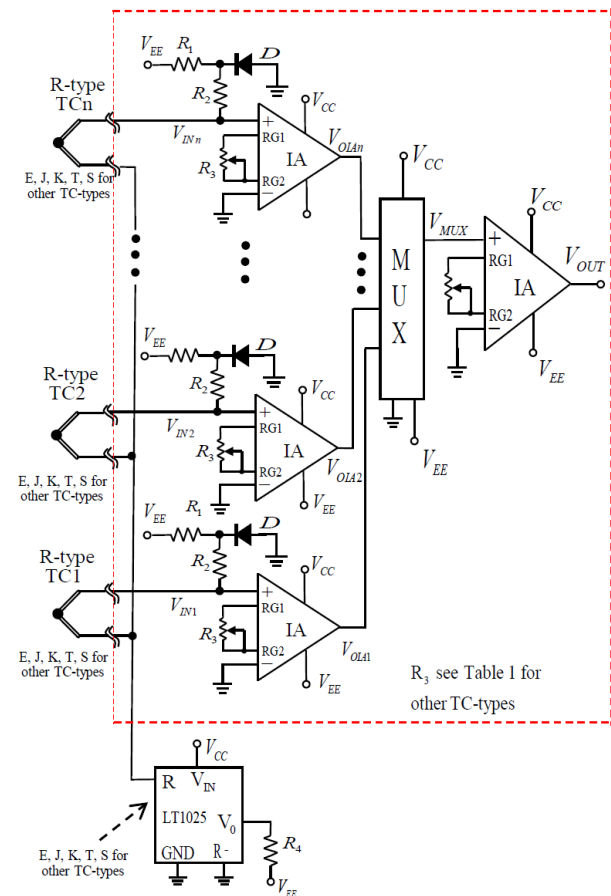


Fig. 8. Interface circuit applicable to multi-channel R-type TC or E, J, K, T, S-type TC based on Fig. 6.

그림 8. 그림 6을 기본으로 한 다채널 R-형 TC 또는 E, J, K, T, S-형 TC에 적용 가능한 인터페이스 회로

인터페이스 회로를 그림 8에 나타냈다. 회로는 n개의 TC, 1개의 냉점보정 반도체, n개의 단선검출 회로와 계측증폭기, 다채널 TC 중 하나를 선택하는 멀티플렉스 (MUX), 그리고 아날로그-디지털(A/D) 변환기의 최종 입력신호로 증폭하는 계측 증폭기로 구성된다.

그림 8에서 LT1025의 R 단자가 TC로 연결되었기 때문에 TC1~TCn은 R-형 TC를 사용하면 된다. E, J, K, T, 그리고 S-형 TC에 대한 다채널 인터페이스로 사용할 경우, LT1025 소자의 E, J, K, T, 그리고 S 단자(그림 4 참조)를 사용하고 해당되는 TC를 사용하면 된다. 또한, TC에 따라 기전력이 다르기 때문에 그림 8의 점선 내부에 있는 R_3 의 값을 표 1에 제시한 저항값으로 선정하면 된다.

16-bit 이상의 A/D 변환기와 마이크로프로세스로 구성된 계측시스템과 구현한 다채널(n개) 냉점보정 및 단선검출회로인 그림 8을 이용하면 n개의 다른 장소에 대한 온도 측정과 각각의 장소에 사용된 TC의 단선 여부를 검출할 수 있다.

III. 실험결과

설계한 그림 6과 8를 개별 소자를 사용하여 실험하였다. 사용한 소자는 $D_1 = \text{IN4937}$, $\text{IA} = \text{AD 620}$, $\text{MUX} = \text{ADG406}$, CJC 소자=LT1025, $R_1 = 10\text{M}\Omega$, $R_2 = 50\text{M}\Omega$, $R_G = 79.4\Omega$, $C_1 = 1\mu\text{F}$ 을 각각 사용하였다. 공급전압은 $V_{CC} = 15\text{V}$, $V_{EE} = -15\text{V}$ 로 설정하였다. 또한, 그림 6과 8에서 E, J, K, T, R, S-형 TC중에 반도체 공정장비인 전기로에서 많이 사용되고 있는 Sentech

사 제품의 R-형 TC를 사용하였고^{[2],[9]}. 그림 8의 회로에서 $n=4$ 로 하여 4-채널에 대한 회로를 실험을 통해 검증 을 하였다.

그림 9은 그림 6에 나타낸 회로에서 냉점보정을 한 경우에 대한 계측 증폭기의 입력 전압 V_{IN} 과 R-형 TC의 특성표에서 제시하는 기전력 출력과의 차이를 나타낸 결과이다. 온도에 따른 R-형 TC의 기전력은 요코가와 (YOKOGWA)사의 TC Calibrator CA320를 사용하여 입력신호로 사용하였다^{[10]-[12]}. 그림 9의 그래프에서 점선은 냉점보정 전의 V_{IN} 과 TC의 기전력의 차를 나타낸 것이고 실선은 냉점보정을 한 V_{IN} 과 TC의 기전력의 차를 나타낸 값이다. 이 결과로부터 냉점보정을 통해 $0^\circ\text{C} \sim 1400^\circ\text{C}$ 의 온도 범위에서 TC의 기전력과 입력전압 V_{IN} 의 차이가 $3\mu\text{V}$ 로 다는 것을 알 수 있다. 즉, TC의 영점보정 후 오차가 0.14mV 에서 $3\mu\text{V}$ 로 감소 되어 약 97.8 % 감소되는 결과를 얻었다.

그림 10은 그림 6에 나타낸 회로에서 냉점보정을 한 경우와 하지 않은 경우에 대한 계측 증폭기(IA)의 출력전압을 나타낸 것이다. 여기서, $0^\circ\text{C} \sim 1400^\circ\text{C}$ 의 온도에 대한 전압을 $0\text{V} \sim 10\text{V}$ 로 출력시키기 위해 이득을 632.44 배 되도록 $R_G = 79.4\Omega$ 으로 설정하였다. 그림 10의 그래프에서 실선은 냉점보정 전의 계측증폭기 출력전압이고 점선은 냉점보정을 한 결과이다. 이 결과로부터 냉점보정을 통해 $0^\circ\text{C} \sim 1400^\circ\text{C}$ 의 온도 범위에 대한 출력전압이 $0\text{V} \sim 10\text{V}$ 으로 정확하게 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

그림 8에 제시한 회로에서 R-형 TC를 4개 사용한 4-채널 인터페이스 회로에서 각각 하나씩 단선되었을 경

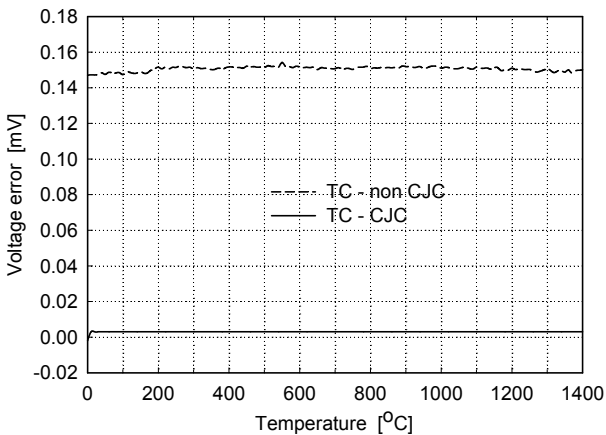


Fig. 9. Input voltage error for the cold-junction compensation result of the circuit shown in Fig. 6.

그림 9. 그림 6에 나타낸 회로의 냉점보정 결과에 대한 입력전압의 오차

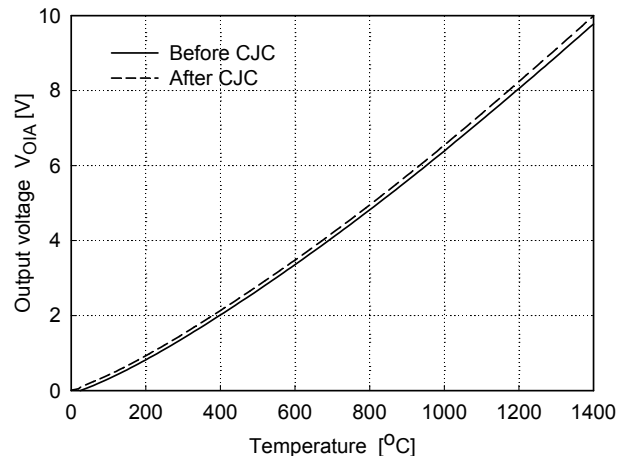


Fig. 10. Output voltage of the result of cold-junction compensation for the circuit shown in Figure 6.

그림 10. 그림 6에 나타낸 회로의 냉점보정 결과의 출력전압

우, 계측 증폭기(IA)의 입력전압 V_{IN} 과 출력 전압 $V_{OIA1} \sim V_{OIA4}$ 을 표 2과 3에 각각 나타냈다. 표 2로부터, 각각의 TC가 단선된 경우 입력 V_{IN} 은 약 -421mV , 단선이 않된 경우에는 V_{IN} 은 약 0.14mV (실온 25°C 에 해당되는 TC의 기전력)가 된다는 것을 알 수 있었다.

표 3으로부터, TC의 입력신호를 계측증폭기로 약 632.44배 증폭한 결과 각각의 TC가 단선된 경우 출력 전압 V_{OIA} 은 약 -14.22V , 단선되지 않은 경우에는 약 $87\text{mV}(= 0.14\text{mV} \times 632.44)$ 가 된다는 것을 알 수 있었다. 따라서, A/D 변환기를 사용하여 V_{OIA} 을 측정하여 부(-) 전압이 나타난 경우에는 TC가 단선이 된 것으로 프로그램하면 된다.

Table 2. Input voltage status of IA when TC is disconnected in the circuit of Figure 8.

표 2. 그림 8의 회로에서 TC가 단선되었을 경우, IA의 입력전압 현황

	TC1	TC2	TC3	TC4
Vin1[mV]	-421.0	0.141	0.141	0.141
Vin2[mV]	0.141	-420.5	0.141	0.141
Vin3[mV]	0.141	0.141	-420.6	0.141
vin4[mV]	0.142	0.141	0.141	-420.5

Table 3. Output voltage status of IA when TC is disconnected in the circuit of Figure 8.

표 3. 그림 8의 회로에서 TC가 단선되었을 경우, IA의 출력전압 현황

	TC1	TC2	TC3	TC4
V_{OIA1} [V]	-14.215	0.087	0.088	0.087
V_{OIA2} [V]	0.087	-14.215	0.087	0.088
V_{OIA3} [V]	0.088	0.088	-14.215	0.088
V_{OIA4} [V]	0.087	0.087	0.87	-14.215

실험환경에 대한 실물 사진을 그림 11에 제시하였다. 이 그림에서 (a)는 Sentech사의 R형 TC이고 (b)는 그림 8에 대한 실험 보드이고 (c)는 요코가와(YOKOGWA)사의 TC Calibrator CA 320이다^{[2], [11]-[12]}.

그림 6의 다양한 TC의 냉정보정과 단락감지 회로에서 표 1과 같은 조건으로 다양한 TC(E, J, K, T, S-형)에 대하여 정상상태와 단선감지를 할 경우에 대한 계측증폭기의 입력전압 V_{IN} 과 출력전압 V_{OIA} 에 대한 값을 측정한 결과를 표 4에 제시하였다. 이 표에서 정상상태의

V_{IN} 전압은 실온(25°C)에 대한 각각의 TC에 대한 기전력이다^[9].

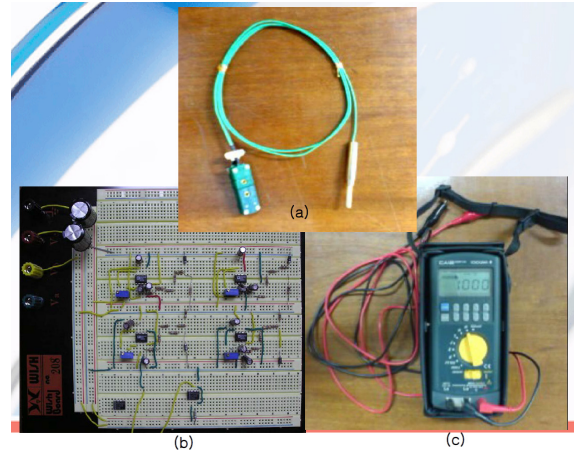


Fig. 11. Experimental environment : R-type TC (a), test board (b), TC simulator (c).

그림 11. 실험환경 : R형 TC(a), 실험보드(b), TC simulator(c)

Table 4. Input and output voltages of the instrumentation amplifier in case of disconnection and steady state for various TCs.

표 4. 다양한 TC에 대한 정상상태와 단선된 경우의 계측증폭기의 입력과 출력전압

TC type	TC states			
	Normal		TC open	
	V_{IN} [mV]	V_{OIA} [V]	V_{IN} [mV]	V_{OIA} [V]
E	1.460	0.1899	-421.0	-14.215
J	1.278	0.1837	-420.5	-14.214
K	1.001	0.1825	-420.5	-14.215
T	0.993	0.4758	-421.0	-14.216
S	0.143	0.0768	-421.0	-14.215

종래의 TC 보상 및 인터페이스 회로들과^{[4], [6-8]}와 본 연구에서 제안한 TC 냉정보정과 단선감지 회로들의 특성 요약을 표 5에 정리하였다. 종래의 인터페이스와 비교할 때 본 연구에서 제안한 인터페이스의 장점은 1) 쉽게 8채널에 대한 TC의 냉정보정 및 단선감지를 쉽게 구현이 가능하고 2) 인터페이스 구성 단가가 낮고, 3) 냉점이 97.8% 보정이 된다는 것이다.

최근 메모리의 대용량화, 선형소자들의 우수한 선형 특성, 마이크로프로세스의 고속화에 의해 TC의 선형화는 S/W로 처리를 하는 추세이다. 본 연구에서도 이를 기초로 하여, 온도에 따른 TC의 기전력을 메모리에 저장한 다음, TC 인터페이스 회로로부터 측정된 아날로그 값과

메모리에 저장된 값을 비교하여 선형화된 최종 온도 값을 정하는 방안으로 프로그램을 개발하면 될 것이다^[13].

Table 5. Summary of characteristics of conventional and proposed TC cooling junction compensation and disconnection detection circuits.

표 5. 종래와 제안한 TC 냉정보상과 단선감지 회로들의 특성 요약

Contents	Ref.[4]	Ref.[6]-[8]	This Work
Supply voltage	-15V ~ +15V	2.7~5.5V	-15V ~ +15V
Applicable TC type	R	K, J, T, N, S, E, B, R	K, J, T, S, E, R
Number of channels	1	1(8 ^{채널})	8
Disconnection detection function	Yes	Yes(need to add circuits)	Yes
Unit price for 8-channel system configuration	LOW	High	LOW
Cold-junction compensation factor	97.8%	-	97.8%

8^{채널} : 1^{°C} 통신으로 8채널을 구성할 경우 8개의 MCP9600 모듈이 필요함

IV. 결론

열전쌍(TC)의 냉점보정 기능과 단선 감지 기능을 갖는 회로설계와 이를 이용한 다양한 TC에 적용할 수 있는 다채널 인터페이스 회로를 구현하였다. R-형 TC를 사용한 경우 TC의 냉점보정 후 오차가 0.14mV에서 3 μ V로 97.8% 감소되었다. 또한, TC가 정상에서 단선되었을 때 계측증폭기의 출력 전압이 88mV에서 -14.2V로 포화된 것을 확인하였다. 설계한 다채널 인터페이스 회로에서 4채널만 고려하여 R-형 TC를 적용 및 실험을 한 결과 유사한 성능을 얻을 수 있었다. 또한, 본 연구에서 제한한 TC의 냉정보정과 단선감지 회로와 다채널 인터페이스 회로는 E, J, K, T, S-형 TC에도 적용이 가능하다는 것을 확인하였고 사용 조건을 제시하였다. 본 연구 결과는 300mm 웨이퍼용 전기로(furnace) 및 다양한 TC를 사용한 다채널 온도 제어 시스템에 매우 유용하게 사용될 것이다.

References

[1] J. J. Carr, "Sensors and circuits ; sensor transducers, and supporting circuits for electronic instrumentation measurement and control," PTA

Prentice Hall, 1993.

[2] <http://www.sentech.co.kr/th1.html>

[3] <http://iseinc.com>

[4] H.-W Cha, Y.-S. Kim, S.-H. Park, P.-S. Hyun, D.-H. Kim, Y.-S. Yun, H.-Y. Ryu, and B.-J. Kim, "Design of R-type thermocouple interface with cold-junction compensator and its broken wire detection," *Proc. of IEEK Summer Conference*, pp.847-848, 2006.

[5] LT1025 Data sheet, Linear Technology Co., 2007.

[6] MCP960X/LOX/ROX Data sheets, "Thermocouple EMF to Temperature Converter, $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ Maximum Accuracy," Microchip Technology Inc., 2015~2021.

[7] <https://www.adafruit.com/product/4101>

[8] https://github.com/Seeed-Studio/Seeed_MCP9600

[9] <https://www.thermocoupleinfo.com/type-R-thermocouple.htm>

[10] AD620 Data sheet, Analog Device Co., 2007.

[11] Process Calibrator CA300 series, Source and Measure Simplicity, YOKOGAWA

[12] User's Manual, CA310 Volt mA Calibrator, CA 320 TC Calibrator, CA330 RTD Calibrator Getting Started Guide, YOKOGAWA

[13] J.-L. Kim, "Implementation of the temperature control system using K-type thermocouple," pp.127-133, Vol.9, no.4, 2004.

BIOGRAPHY

Hyeong-Woo Cha (Member)



1989 : BS degree in Department of Semiconductor Engineering, Cheongju University.

1991 : MS degree in Department of Electronic Engineering, Cheongju University.

1997 : Ph. D. degree in Shizuoka University Graduate School of Electronic Science, Japan.

1991~1993 : Chief Researcher, Blue Code Technology Co., Ltd.

1997~2023 : Professor, Department of Electronic Engineering, Cheongju University