

NTC thermistor를 사용한 voltage divider 회로에서 divider resistance결정

구자훈*, 김종대, 이완연, 박찬영, 김유섭, 송혜정

한림대학교 컴퓨터공학과*
한림대학교 유비쿼터스 컴퓨팅학과

asqw1414@hallym.ac.kr, kimjd@hallym.ac.kr, yskim01@hallym.ac.kr
cypark@hallym.ac.kr, wanlee@hallym.ac.kr, hjsong@hallym.ac.kr

Determination of divider resistance in voltage divider circuits used NTC thermistor.

Ja-Hun Ku*, Jong-Dae Kim, Yu-Seop Kim,
Chan-Young Park, Wan-Yeon Lee, Hae-Jung Song

Dept of Computer Engineering, Hallym University*
Dept of Ubiquitous Computing, Hallym University

요 약

본 연구에서는 제한된 온도 영역에서 보통 정밀 온도 측정 소자로 많이 쓰이는 NTC 써미스터를 사용하여 전압 분배 회로(voltage divider circuits)를 구성하였다. 분압 저항이 온도측정 해상도에 미치는 영향을 분석하고, 회로의 분압 저항을 결정하는 방법으로서 측정하고자 하는 온도 구간의 최대 온도와 최저 온도의 NTC 써미스터 저항 값을 조화평균을 사용하여 분압 저항(divider resistance)으로 사용하였다. 선택한 분압 저항이 이상적인 저항인지에 대하여 조화평균으로 계산한 분압 저항과 대조군 저항으로 전압 분배 회로를 병렬로 구성하였다. 센서들을 항온조 넣어 설정온도(50°C, 70°C, 90°C)에서 각각의 온도를 측정 후 측정 데이터의 표준편차를 구하여 평균 온도 분해능을 비교 하는 실험을 하였다. 실험결과 측정온도 구간의 최대 온도와 최소 온도에서의 NTC 써미스터 저항 값을 조화평균으로 계산한 분압 저항 값이 대조군 저항에 비해 설정온도에서 보다 높은 평균 온도 분해능(sensing resolution)을 보였다.

1. 서 론

NTC thermistor는 제한된 온도 영역에서 보통 정밀 온도 측정 소자로 많이 쓰이는 platinum sensor보다 온도 상수가 10배 이상으로 민감도가 좋고, 저가격, 빠른 응답, 다양한 모양과 크기 등의 장점을 가지고 있다 [1],[2]. 이와 같은 장점 때문에 제한된 온도 범위를 다루는 바이오메디컬 분야에서는 NTC thermistor가 주로 채택되고 있다[3].

NTC thermistor를 이용하여 온도를 측정할 경우 주로 브릿지회로 (bridge circuit) 나 분압기 (voltage divider)를 사용하며 비선형 특성으로 인하여 여러 가지 선형화 방법이 연구되었다[4-6]. 그러나 NTC thermistor의 민감도가 매우 좋으므로 간단한 분압기로 정전압을 분압하여 ADC를 통하여 측정해도 좋은 해상도를 얻을 수 있다 [1]. 분압기를 이용하여 온도에 따른 저항 변화를 전압변화로 바꾸는 경우, 분압 전압의 온도에 따른 민감도가 변하여 온도 분해능이 온도에 따라 변하게 된다. 결과적으로 온도 분해능은 온도와 분압 저항 (divider resistance)의 함수가 되어 최적의 분압 저항 값을 선정해야 한다. 다시 말하면 분압 저항값은 온도 분해능에 지대한 영향을 미친다. 그러나 적절한 저항 값을 주관적

조사 (subjective test)를 통하여 선정한 연구 외에는 체계적으로 조사한 연구가 찾아 볼 수가 없다[1].

본 논문에서는 정해진 온도 집합에서의 평균 온도 분해능이 최고가 되도록 분압 저항 값을 선정하는 방법을 논한다. [1]에서는 이상적인 회로를 가정하고 simulation을 통해서 얻은 온도-전압 특성 곡선과 그 밖의 다른 사항들을 고려해서 주관적으로 선정했다.

온도 측정 오차에는 신호 잡음 외에 ADC의 오차를 포함하고 있으며 해석적으로 분석하기에는 복잡한 형태를 나타내고 있다[7]. 그러므로 본 논문에서는 실험을 통해서 결정하였다.

실험은 0.2°C interchangeable thermistor 다수를 이용하여 병렬로 회로를 구성하여 항온조에 넣고 구성된 회로로부터 온도를 측정하기 위해서 MCU(PIC18F4550)의 내장 ADC(10bits)를 사용하였으며, 측정된 ADC data(10,000개)를 사용하여 Stein-Hart equation으로 온도를 구하고 측정된 온도의 표준 편차의 합을 비교한 결과 측정하고자 하는 구간의 최대 온도와 최저 온도의 조화평균 값을 사용한 회로에서 가장 높은 sensing resolution을 보였다.

2. 실험방법

2.1. 해상도의 정의

측정값을 평균하면 측정 빈도가 높아질 수록 error 표준편차는 ADC quantization error 표준편차에 근접하며 (white Gaussian noise를 무시할 수 있다) 사용 대상 온도들에 대하여 측정값의 표준편차의 합이 가장 작은 값을 나타낼 경우 최대 해상도라고 정의 한다.

2.2. Voltage divider circuits

NTC thermistor를 이용하여 온도를 측정할 경우 주로 브릿지회로나 분압기를 사용하며 비선형 특성으로 인하여 여러 가지 선형화 방법이 연구되었다[4-6]. 그러나 브릿지회로를 사용하여 멀티채널로 연결할 경우 채널 변경이 느리고 회로의 부피가 커진다는 단점이 있다[1]. NTC thermistor의 민감도가 매우 좋으므로 간단한 분압기로 정전압을 분압하여 ADC를 통하여 측정해도 좋은 해상도를 얻을 수 있다 [1]. 그림 1.은 온도 측정 분압기 회로를 구성한 모습이다.

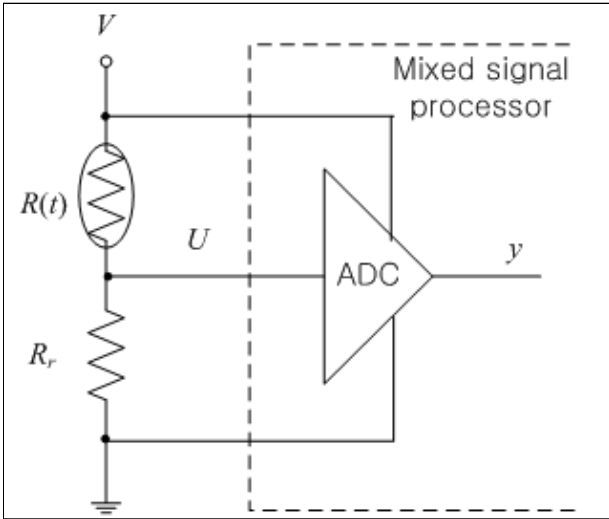


그림 1. NTC thermistor를 이용한 온도 측정 분압기 회로

2.3. Temperature resolution의 구간 평균을 최적화하는 divider resistance

그림 1.에서 NTC thermistor $R(t)$ 와 reference 저항 R_r 을 사용하여 온도를 측정하는 회로를 보였다. 온도가 높아질 수록 thermistor 저항 값이 감소하여 divider voltage U 가 높아 진다. ADC bias 전압과 입력 전압과의 비 u 는 다음 식을 만족한다.

$$\frac{U}{V} = u(t) = \frac{R_r}{R_r + R(t)}, \quad 0 \leq u(t) < 1 \quad (1)$$

$R(t)$ 가 다음 식과 같이 온도에 대하여 monotonic decrease 하므로 u 는 온도에 대하여 monotonic increase 한다.

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \frac{1}{\beta} \ln r \Leftarrow r = \frac{R_r}{R_{25}}, T_0 = 298.15(25^\circ\text{C}) \quad (2)$$

그러므로 임의의 온도 t 에서 온도에 대한 전압 u 의

sensitivity는 du/dt 에 비례하고, n bit ADC가 $0 \sim V$ 를 linear하게 digitize한다면 해당온도에서의 step 당 온도 resolution은 다음과 같다.

$$\Delta t = \frac{1}{2^n} \frac{dt}{du} \quad (3)$$

그러므로 측정하고자 하는 온도 범위에서의 평균 resolution을 최소로 하기 위하여 sensitivity의 적분 값을 최대로 하면 된다. 한편 ADC 입력 전압 u 가 monotonic increase하므로 온도 측정 범위가 $[t_m, t_M]$ 이라면 total sensitivity 합 S 는 다음과 같다.

$$S = \int_{t_m}^{t_M} \frac{du}{dt} = u(t_M) - u(t_m) \quad (4)$$

그러므로 측정 범위의 양끝의 온도에 해당하는 thermistor의 저항 값으로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$S = u(t_m) - u(t_M) = \frac{R_r}{R_r + R_m} - \frac{R_r}{R_r + R_M} = \frac{R_r(R_m - R_M)}{(R_r + R_M)(R_r + R_m)} \quad (5)$$

여기서 $R_m = R(t_m), R_M = R(t_M)$ 이다.

S 를 R_r 에 관하여 미분하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dS}{dR_r} = \frac{(R_m - R_M)}{(R_r + R_M)^2 (R_r + R_m)^2} (\sqrt{R_M R_m} + R_r)(\sqrt{R_M R_m} - R_r) \quad (6)$$

즉 total sensitivity S 는 $R_r = \sqrt{R_M R_m}$ 일 때 최대가 된다.

2.4. 측정 대상 divider 저항 값이 선택

사용 온도들의 범위가 $[a, b]$ 이고, 그 때의 저항 값이 R_a, R_b 라고 하면 최대 해상도를 내는 voltage divider 저항의 근처일 것이다. 그러므로 측정할 divider 저항 값은 온도 a, b 에 해당하는 저항들, 다음에 a, b 의 조화평균에 해당하는 저항 값, 다음에 그 값과 각 끝 온도 사이의 조화 평균에 해당하는 저항 값 순으로 정한다.

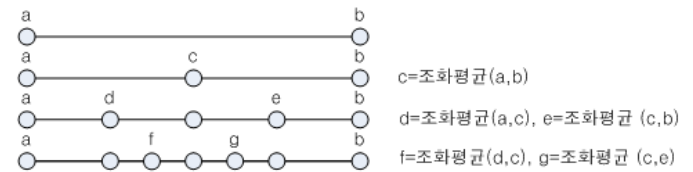


그림 2. 온도 기준으로 정렬한 측정 대상 divider 저항 값

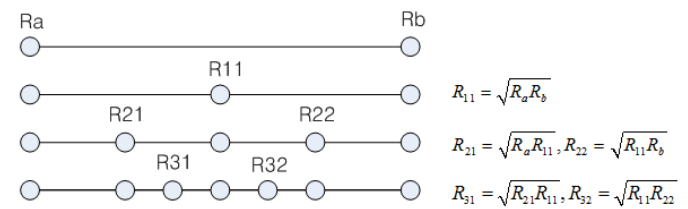


그림 3. 저항 기준으로 정렬한 측정 대상 divider 저항 값

본 논문에서 채택한 온도 집합은 대표적인 바이오 장비인 PCR 장치 (Polymerase Chain Reaction System)의 중요 온도에 근사한 $50^\circ\text{C}, 70^\circ\text{C}$, 그리고 90°C 등 3개의

온도로 구성했다. 비교할 분압 저항 값으로는 최대, 최저 온도의 NTC thermistor 저항값과 이들 사이의 값을 조화평균으로 보간한 저항 값, 그리고 다시 이들을 조화평균으로 보간 하는 방식으로 총 9개의 저항 값을 채택하여 회로를 구성하고 항온조의 설정온도(50℃, 70℃, 90℃)에서 측정하여 온도 데이터를 기록하였다.

25℃에서 10KΩ의 저항 값을 가지는 USSensor NTC thermistor PT103J2에 대하여 측정 대상 voltage divider 저항 값들을 계산하면 표 1.에 보인 것과 같다.

표 1. 측정 대상 divider 저항 값

	R20								R100
계산 값	12,493	8,680	6,031	4,191	2,912	2,023	1,406	977	679
실제사용 값	13K	9.1K	6.2K	4.3 K	3 K	2 K	1.5 K	1 K	680
DMM 측정값	13.25 K	9.04 K	6.24 K	4.24 K	2.975 K	1.986 K	1.496 K	976	676

표준 저항에서 근사한 값들을 찾아보면 실제사용 값 행에서 보인 저항 값을 채택할 수 있다. DMM 측정값은 표준 저항의 오차가 0.5%이기 때문에 DMM을 사용하여 측정한 저항값이다.

2.5. Sensor calibration

정확한 온도 측정을 위해서는 센서를 calibration해서 사용해 한다. 이번 연구에서 사용하는 0.2℃ interchangeable thermistor는 calibration하면 다수의 thermistor가 동질의 특성을 가질 것이다.

이번 연구에서는 Steint-Hart equation[8]을 사용하는 데 이 수식은 3개의 coefficient(A, B, C)를 사용하기 때문에 3-Points calibration을 할 수 있다.

그림 4.와 같이 항온조에 9개의 센서를 담가 설정온도에서의 저항 값(10,000개)을 기록한 후 항온조 설정온도와 기록한 저항의 평균값을 사용하여 9개 sensor calibration한다.

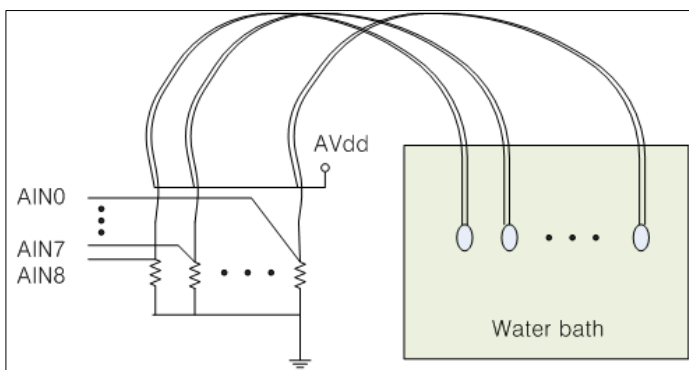


그림 4. divider resistor 결정 실험 장치

2.6. ADC 내장 processor

분압회로에서 측정 온도에 따라 분압 저항의 저항 변화 및 전압 변화를 측정하기 위해서 DMM(Digital MultiMeter)를 사용할 수 있으나 휴대용 DMM의 경우 data를 육안으로 판독해야 돼서 오차의 원인이 되고, PC에 data 기록이 가능한 DMM의 경우 가격이 바싸고 DMM은 멀티채널 sensing 회로를 구성하기 힘들다.

ADC가 내장된 processor를 사용할 경우 저가의 가격으

로 시스템을 구축할 수 있으며 하나의 processor를 사용하여 멀티채널 sensing 회로를 구성 할 수 있다.

본 연구에서는 ADC가 내장된 processor인 PIC18F4550을 사용한다.

2.7. Sampling time

본 연구에서 사용하는 PIC18F4550의 경우 sampling -holding하여 ADC 후 다음 ADC를 sampling switch 할 때 switching 시 순시 전압이 발생하여 ADC noise의 원인이 된다. switching noise 제거를 위해서 최소 3TAD 만큼의 delay가 필요하다[9]. 이런 문제를 해결하기 위해서 MCU의 sensing time을 1msec로 고정하고 PC에서 MCU의 데이터를 읽어오는 시간은 50msec로 고정한다.

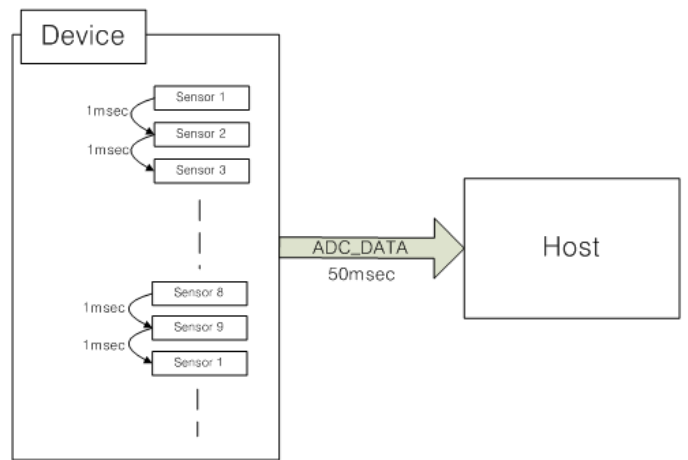


그림 5. Host-device communication time

2.6. ADC data로부터 온도 구하기

[그림 1]에서 ADC에 인가되는 전압(U)을 ADC한 data를 사용하여 센서의 온도를 계산하게 된다.

$$ADC\ data = \frac{V_{in}}{V_{ref+}} \times ADC\ bits \quad (7)$$

ADC bits는 PIC18F4550의 ADC resolution이 10bits는 2¹⁰인 1023의 값을 가진다.

다음의 과정을 통하여 PIC18F4550에서 측정한 ADC data를 사용하여 thermistor에서 측정되는 온도를 계산할 수 있다.

측정온도 구간이 50℃,70℃,90℃의 3구간을 측정하므로 3-points calibration을 위해서 Stein-Hart equation(9)을 사용하여 온도를 구한다[9].

$$R_t = R_b \times \left(\frac{1024}{ADC\ data} - 1 \right) \quad (8)$$

R_t = Thermistor resistance at current temperature.

$$\ln R = \log(R_t)$$

$$T = \frac{1}{A + B \times \ln R + C \times \ln R^3} \quad (9)$$

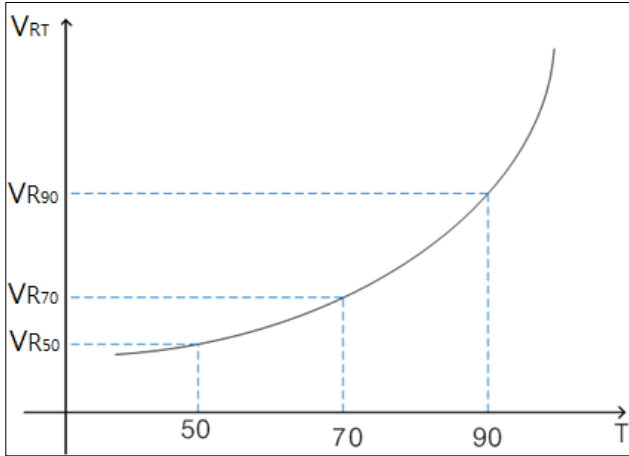


그림 6. 온도변화에 따른 divider 저항의 전압

그림 6.은 온도가 증가함에 따라 분압 저항에 인가되는 전압의 변화를 나타낸 것이다.

2.8. 온도 측정 및 데이터 분석 방법

온도 측정할 때 thermistor를 시간차를 두고 각각 온도를 측정할 경우 긴 측정 시간과 항온조의 시간에 따른 온도 변화 우려가 있다. PT103J2가 interchangeable하므로 그림 4.와 같이 9개 센서를 병렬로 연결하여 동시에 항온조에 넣고 실험을 한다.

항온조의 온도를 50°C, 70°C, 90°C로 설정하고 분압 저항의 전압(ADC data)를 10,000번씩 sampling한다. 측정된 10,000개의 data를 calibration된 Stein-Hart equation을 사용하여 계산된 온도의 표준편차를 분석하여 분압 저항값에 따른 온도 분해능을 비교하여 설정 온도 구간 내에서의 이상적인 분압 저항값을 결정한다.

3. 실험결과

3.1. Sensor calibration

온도의 정확한 측정을 위해서는 센서를 calibration해서 사용한다. 이번 연구에서 사용한 Stein-Hart equation 수식은 3개의 coefficient(A, B, C)를 사용하기 때문에 3-Points calibration을 수행하였다. 항온조에 9개의 센서를 담가 설정온도(50°C, 70°C, 90°C)에서의 저항 값(10,000개)을 기록한 후 항온조 설정온도와 기록한 저항의 평균값을 사용하여 9개 sensor calibration한다. Sensor calibration을 통하여 표 2.와 같은 결과를 얻었다.

표 2. Sensor calibration 전/후 resolution

	50°C		70°C		90°C	
	b	a	b	a	b	a
#1	48.75	50.00	68.68	70.00	88.51	90.00
#2	49.60	50.00	69.16	70.00	88.67	90.00
#3	48.76	50.00	68.60	70.00	88.40	90.00
#4	47.46	50.00	67.17	70.00	86.89	90.00
#5	48.99	50.00	69.10	70.00	88.39	90.00
#6	51.43	50.00	71.38	70.00	90.64	90.00

#7	51.37	50.02	72.44	70.00	87.92	90.01
#8	49.03	50.00	69.06	70.00	88.70	90.00
#9	49.16	50.00	68.14	70.00	87.07	90.00

b : before calibration. a : after calibration.

표 2.에서 b열은 USSensor에서 제공하는 써미스터의 R-T curve 테이블의 값으로 계산된 계수를 사용한 Stein-Hart equation으로 측정된 저항 값을 온도로 계산한 값이다. a열은 설정온도와 측정된 저항 값의 평균을 사용하여 calibration한 Stein-Hart equation으로 계산된 온도 값이다.

3.2 온도 측정 결과

Calibration한 써미스터를 항온조(water bath)에 넣은 후 10,000개 데이터를 기록 후 각 sensor의 표준편차(STDEV)를 분석한 결과는 표 3.과 그림 7.과 같다.

표 3. 측정온도 표준편차

	50C	70C	90C	sum
#1	0.578915	0.367034	0.569937	1.515886
#2	0.406313	0.32221	0.335379	1.063903
#3	0.258559	0.318421	0.413041	0.990022
#4	0.171577	0.193796	0.277413	0.642786
#5	0.131931	0.183923	0.29898	0.614835
#6	0.116659	0.086849	0.122213	0.325721
#7	0.171862	0.150992	0.219082	0.541936
#8	0.438675	0.279964	0.37272	1.091358
#9	0.426404	0.283714	0.382918	1.093036

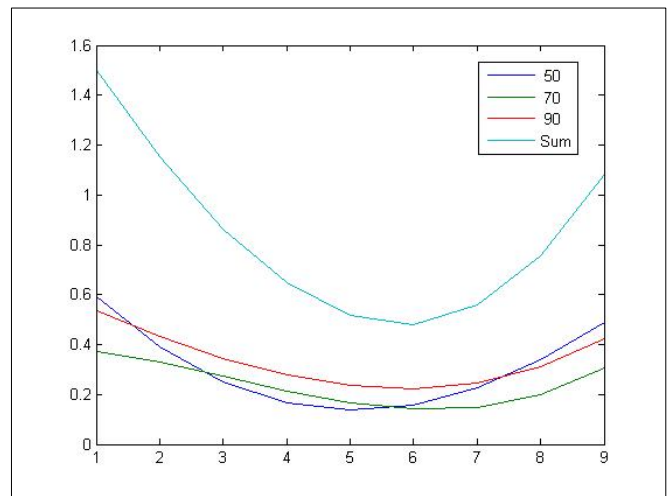


그림 7. 측정온도 표준 편차

그림 7.은 표 2.의 결과를 Matlab의 polyfit함수를 사용하여 3차식으로 표현한 그래프이다.

측정결과를 분석한 결과 측정온도 구간의 최대 온도와 최소 온도의 써미스터 저항 값을 조화 평균으로 사용한

센서 회로(sensor 6)에서 가장 높은 온도 분해능을 보였다.

4. 결론

이번 연구에서는 제한된 온도 영역에서 정밀 온도 측정 소자로 많이 쓰이는 NTC 써미스터를 사용하여 간단한 전압 분배회로를 구성하여 온도를 측정할 때, 측정하고자 하는 온도 구간의 최대 온도와 최저 온도에서의 써미스터 저항 값의 조화평균 값을 분압저항 값으로 결정하는 것이 온도 측정의 해상도를 높이는데 이상적인 값인지에 대해 실험을 통해서 증명해 보았다.

실험에서는 센서의 정밀도를 높이기 위해서 3-points calibration 가능한 Stein-Hart equation을 사용하여 다수의 써미스터가 동질의 특성 가지도록 하였다. 항온조의 설정온도(50℃, 70℃, 90℃)에서 9개의 써미스터를 병렬로 연결하여 온도를 측정한 후 각 센서의 측정 데이터의 표준편차를 분석하였다. 분석결과 표 3의 결과와 같이 측정온도의 최소온도 50℃와 최대온도 90℃의 조화평균값 $\sqrt{3602 \times 915.5} = 1815.938$ 과 근접한 Sensor6(2KΩ)을 사용한 회로에서 가장 높은 sensing resolution을 보였다. 이것은 voltage divider circuits을 사용하는 온도 측정 시스템을 설계할 때, 측정하고자 하는 온도 구간이 예측이 가능하다면 회로의 분압 저항을 측정 온도 구간의 최대 온도와 최소 온도에서 써미스터 저항값의 조화평균 값으로 voltage resistance를 결정하여 회로를 설계할 수 있음을 보여준다.

Acknowledgements

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2010-0015951).

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology (No. 2010-0015951).

참고문헌

- [1] Hans-Georg Schweiger, Michael Multerer, and Heiner Jakob Gores, "Fast Multichannel Precision Thermometer," IEEE, VOL. 56, NO. 5, p.2, 2007
- [2] Viktor Marić, D. Luković, Ljiljana Žživanov, Obrad Aleksić, and Aleksandar Menićanin, "EM Simulator Analysis of Optimal Performance Thick-Film Segmented Thermistors versus Material Characteristics Selection," IEEE, VOL. 57, NO. 11, p.2, 2009
- [3] Chiachung Chen, "Evaluation of resistance - temperature calibration equations for NTC thermistors," ScienceDirect, p.1-2, 2009

- [4] ANWAR A. KHAN AND R. SENGUPTA, "A Linear Temperature/Voltage Converter Using Thermistor in Logarithmic Network," IEEE, VOL. IM-33, NO. 1, p.1-2, 1984
- [5] Carl Renneberg, Torsten Lehmann, "Analog Circuits for Thermistor Linearization with Chebyshev-Optimal Linearity Error," IEEE, p.912, 2007
- [6] BetaTherm INC. "BetaThermBetaLinear.pdf,"
- [7] Filippo Attivissimo, Nicola Giaquinto, Mario Savino, "Uncertainty evaluation in dithered ADC-based instruments," ScienceDirect, p.366, 2008
- [8] S. R. Hart and J. S. Steinhart, "Calibration curves for thermistors," Deep-Sea Res., vol. 15, p.497, 1968
- [9] Microchip INC. "PIC18F2455/2550/4455/4550 Data sheet," p.269