

인공위성용 서미스터의 온도측정 정확도 분석

석병석*, 이윤기**, 이나영***

Accuracy analysis on the temperature measurement with thermistor

Byong-Suk Suk*, Yun-Ki Lee**, Na-Young Lee***

Abstract

The thermistors and AD590 are widely used for temperature measurement in space application. The resistance of thermistor will vary according to the temperature variation therefore the external voltage or current stimulus signal have to be provided to measure resistance variation. Recently high resolution electro optic camera system of satellite requires tight thermal control of the camera structure to minimize the thermal structural distortion which can affects the image quality. In order to achieve 1°(deg C) thermal control requirement, the accuracy of temperature measurement have to be higher than 0.3°(deg C). In this paper, the accuracy of temperature measurement using thermistors is estimated and analyzed.

초 록

인공위성에 사용되는 온도 측정 센서는 서미스터(Thermistor) 와 AD590이 주로 많이 사용되고 있다. AD590은 IC chip 으로 서미스터에 비해 고가이며 1℃ 온도 변화에 출력 전류가 약 1μA 변하는 특성을 가진다. 이에 비해 서미스터는 온도 변화에 따라 저항 값이 변하므로 외부에서 전류나 혹은 전압 stimulus를 인가해 주어야한다. 또한 일반적으로 AD590에 비해 저가이며 NTC(Negative Temperature Coefficient)와 PTC(Positive Temperature Coefficient) 두 가지 형태의 센서가 사용되고 있다. 고 정밀 저궤도 지구관측용 인공위성의 경우 온도에 따른 카메라 구조물의 변형이 최종 영상 품질에 영향을 미치게 되므로 고 품질의 영상획득을 위하여 카메라 구조물의 정밀 온도 제어가 필수적으로 요구되며 이를 구현하기 위해서 매우 정확한 온도측정 요구조건이 주어지게 된다. 저궤도 인공위성의 경우 카메라 시스템에 부착된 온도센서의 측정 정확도 요구조건이 0.3℃ 까지 요구되는 경우도 있다. 본 논문은 저 궤도 인공위성에 적용된 서미스터의 온도 측정 정확도에 대한 분석 내용을 나타내었다.

키워드 : 서미스터(Thermistor), 온도센서(Temperature Sensor),
온도측정(Temperature Measurement)

접수일(2007년 11월 30일), 수정일(1차 : 2008년 6월 5일, 2차 : 2008년 6월 17일, 게재확정일 : 2008년 7월 1일)

* 다목적3호체계팀/byongss@kari.re.kr

** 위성전자팀/yklee@kari.re.kr

*** 다목적3호체계팀/nylee@kari.re.kr

1. 서 론

인공위성에 사용되는 온도 측정 센서는 서미스터(Thermistor) 와 AD590이 주로 많이 사용되고 있다. AD590은 IC chip 으로 서미스터에 비해 고가이며 1°C 온도 변화에 출력 전류가 약 1 μ A 변하는 특성을 가진다. 이에 비해 서미스터는 온도 변화에 따라 저항 값이 변하므로 외부에서 전류나 혹은 전압 stimulus를 인가해 주어야 한다. 또한 일반적으로 AD590에 비해 저가이며 NTC(Negative Temperature Coefficient) 와 PTC(Positive Temperature Coefficient) 두 가지 형태의 센서가 사용되고 있다.

고 정밀 저궤도 지구관측용 인공위성의 경우 온도에 따른 카메라 구조물의 변형이 최종 영상 품질에 영향을 미치게 되므로 고 품질의 영상 획득을 위하여 카메라 구조물의 정밀 온도 제어가 필수적으로 요구되며 이를 구현하기 위해서 매우 정확한 온도측정 요구조건이 주어지게 된다. 저궤도 인공위성의 경우 카메라 시스템에 부착된 온도센서의 측정 정확도 요구조건이 0.3°C 까지 요구되는 경우도 있다.

본 논문은 저 궤도 인공위성에 적용된 서미스터의 온도 측정 정확도에 대한 분석 내용을 나타내었다.

2. 오차 요인 분석

2.1 서미스터 특성

일반적으로 서미스터를 이용하여 온도를 측정하기 위해서는 외부에서 서미스터에 전류나 혹은 전압 stimulus를 인가한 후 서미스터의 저항 변화를 감지하여 온도로 환산하는 방법을 사용하고 있다. 따라서 서미스터를 이용하여 온도를 측정하는 과정에서 측정 정확도에 영향을 미치는 요소로는 외부 stimulus 신호의 정확도, 서미스터의 저항 특성 및 드리프트(drift) 오차, 하니스 저항에 의한 오차, 그리고 노이즈 오차 등으로 볼 수 있다.

현재 인공위성용으로 많이 사용되는 서미스터의 종류로는 PT100, PT1000, 그리고 YSI 등이 있다. 그림 1과 2는 이러한 서미스터들의 온도에 따른 저항 특성을 나타낸 그래프이다. PT100과 PT1000의 경우는 온도변화에 따른 저항 특성이 거의 선형인 반면 YSI는 비선형 특성을 가진다. 그리고 PT100, PT1000의 경우는 저항값이 YSI에 비해 상대적으로 매우 작음을 알 수 있다. 이러한 저항 특성 때문에 만약 동일한 정 전류값으로 stimulus를 인가한다면 YSI 계열 서미스터가 PT 계열 보다 상대적으로 높은 전압이 생성되는 장점을 가지고 있다. 또한 YSI 계열은 PT 계열에 비해 상대적으로 측정 온도 범위가 좁은 면이 있지만 우주용으로 사용하기에는 충분한 측정 온도 범위를 가진다.

일반적으로 측정 정확도를 높이기 위해서는 A/D 변환 시 측정 해상도(resolution)를 높이는 것이 유리하며 이를 위해서는 서미스터에 생성되는 전압을 A/D 변환 회로가 허용 가능한 전압 범위 내에서 최대로 잡아 주면된다. 상대적으로 낮은 저항값을 가지는 PT 계열의 경우 YSI에 비해 매우 큰 stimulus 전류를 인가해 주어야 되며 이렇게 할 경우 소모 전력이 증가하는 단점이 있다.

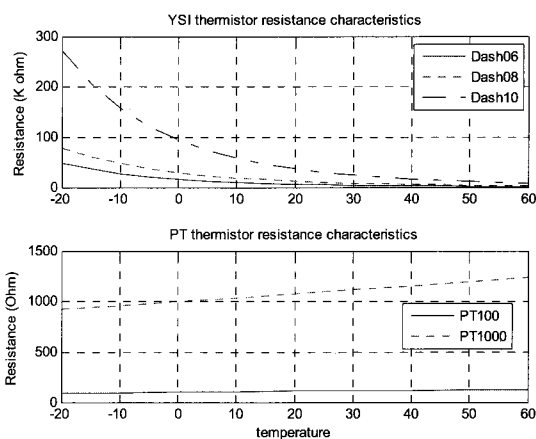


그림 1. 서미스터 저항 특성

저항값 특성과 더불어 단위 온도 변화에 대한 저항 변화율($\Omega/^\circ\text{C}$)(민감도: sensitivity) 특성이

온도 측정 정확도에 더 큰 영향을 미치는 요소이며 일반적으로 변화율이 클수록 유리하다. 그림 2에서 YSI와 PT 계열의 민감도를 나타내었으며 그림에서 알 수 있듯이 YSI의 민감도가 PT 보다 훨씬 큼을 알 수 있다.

YSI 계열은 dash number 01에서 10까지 10가지 종류의 서미스터를 다양하게 제공하고 있으며 각각의 dash number는 상온(25°C)에서의 저항 값이 다른 것이다. 적용하고자 하는 목적에 따라서 적절히 dash number를 선택하여 사용할 수 있게 되어 있으며 또한 dash number가 짝수인 것은 홀수인 센서에 비해 저항 허용 한계(resistance tolerance)가 10배 정도 좋은 센서이다. 저항 허용 한계는 데이터 시트에 주어진 온도에 따른 저항 값과 실제 센서가 가지는 저항 값의 오차 범위를 나타내는 것으로 작을수록 센서 자체의 정밀도가 높음을 의미한다.

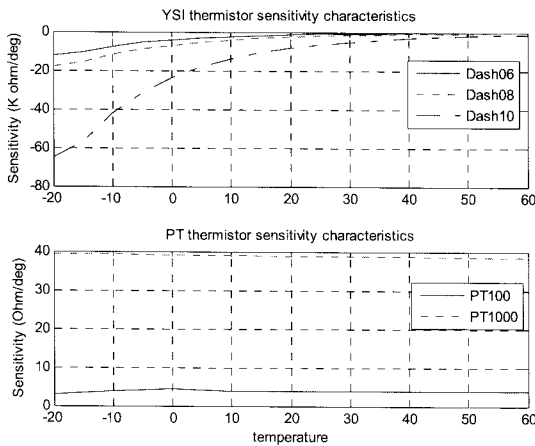


그림 2. 서미스터 민감도 특성

2.2 정 전류 회로 안정도

서미스터를 이용하여 온도를 측정하기 위해서는 외부에서 전압 혹은 전류 stimulus를 공급해 주어야 한다. 아래 그림 3은 저궤도 인공위성에 사용된 정 전류 회로를 나타낸다. 정 전류 회로는 NIC(Negative Impedance Converter) 형태를 사용하여 서미스터 쪽으로 일정한 전류를 공급하는 회로이다.

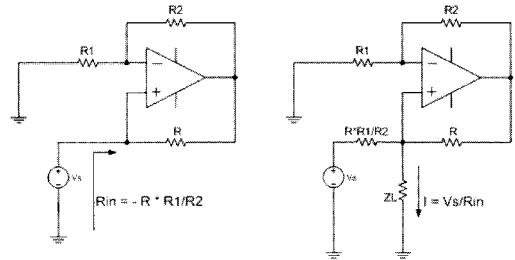


그림 3. 정 전류 회로도

그림의 왼쪽에서 OP AMP의 양극(positive) 입력 단에서 바라본 등가 저항은 R1, R2, R의 조합으로 주어지게 되며 음의 값을 가지는 것이 특징이다. 따라서 음의 값을 가지는 입력저항과 동일한 값의 저항 값을 그림의 오른쪽과 같이 입력 단에 달아주게 되면 NIC (negative impedance converter) 회로가 되어 정 전류 회로로 동작하게 된다. 필요한 stimulus 전류 값을 결정하기 위해서는 주어진 회로의 R1, R2, R, 입력 등가저항, 그리고 전원 전압(Vs) 등의 값을 식 (1)에 나타낸 것과 같이 적절히 선정하면 된다.

$$I = \frac{V_s}{R_{\in}} \quad (1)$$

$$R_{\in} = R \frac{R_1}{R_2}$$

서미스터에 인가하는 전류는 저항을 거쳐 전압으로 변환되며 이러한 변환된 전압을 최종적으로 측정하게 된다. 따라서 서미스터에 공급하는 전류의 미세 오차는 측정 전압의 오차로 나타나며 이 오차의 양은 전류 변화량과 서미스터 저항값의 곱으로 주어지게 된다. 따라서 최종 측정 전압의 오차를 최소화하기 위해서는 정 전류 회로에서 출력되는 전류값의 오차를 최소화 하는 것이 가장 중요하다. 그림 3에 나타낸 정 전류 회로의 출력 전류 안정도(stability)분석의 결과를 아래 표 1에 정리하였다. 분석을 위하여 그림 3에 나타낸 OP AMP는 이상적인 OP AMP라고 가정을 하였으며 회로의 저항을 RNC90, RNC50 그리고 RM0603 모델인 경우에 대하여 각각의 출력 전류 안정도 분석 결과를 표 1에 나타내었다.

표 1. 출력 전류 안정도 분석

시정 저항		RNC90	RNC50	RM000G
분석 방법				
EVA		0.7200%	3.2400%	1.6800%
RSS		0.6030%	1.9330%	0.7982%
Mote Carlo	Vref=9.94V	0.7251%	3.8106%	1.9060%
	Vref=10.06V	0.7676%	3.8509%	1.9379%
직관적 분석	L_min	0.6993%	2.7397%	1.4866%
	L_max	0.7007%	2.8629%	1.5136%

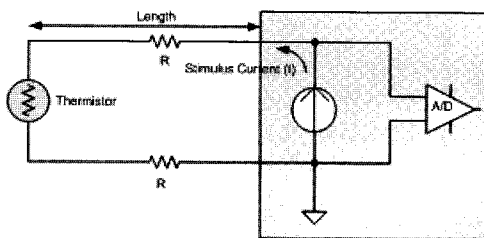
* EVA : Extreme Value Analysis,
RSS : Root Square Sum

표 1에서 알 수 있듯이 가장 성능이 우수한 RNC90 저항을 사용할 경우 약 0.7% 정도의 출력 전류 안정도를 가짐을 알 수 있으며 분석의 가정에서 OP AMP를 이상적으로 가정하였으므로 이러한 OP AMP 영향을 고려하면 실제 상황에서는 약 1% 정도의 출력 전류 안정도를 가질 것으로 예상된다.

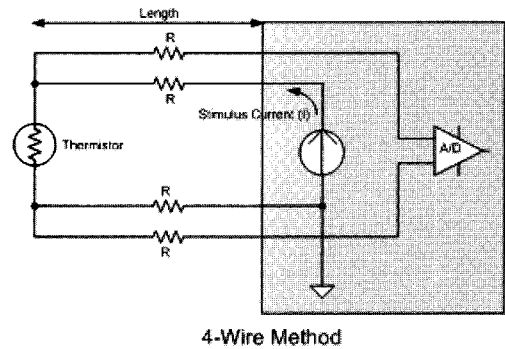
2.3 하니스 손실

하니스 저항이 온도센서 측정 정확도에 미치는 영향을 그림 4에 나타난 온도 측정을 위한 두 가지 개념도를 기본으로 분석하였다.

그림4에서처럼 서미스터 온도 센서의 측정은 4-wire 방식 과 2-wire 방식으로 구분할 수 있으며 일반적으로 2-wire 방식을 많이 사용하고 있으며 매우 정밀한 측정이 요구되는 경우 4-wire 방식을 사용하고 있다.



2-Wire Method



4-Wire Method

그림 4. 하니스 오차 모델

4-wire 방식은 하니스 저항에 의한 전압 강하 오차를 배제할 수 있는 방식으로 정확한 측정이 가능하나, 만약 온도 센서의 개수가 많고 또한 측정 장치로부터 거리가 먼 경우 양적으로 두 배의 하니스를 사용함으로써 인한 중량 증가와 측정 장치 커넥터에 할당해야 하는 신호 핀 수가 많아지는 단점이 있다. 따라서 일반적으로 많이 사용하고 있는 2-wire 방식을 이용하여 서미스터 온도 측정을 할 경우 하니스 저항에 의한 측정 오차 요인을 분석하고 표 2에 정리하였다.

분석을 위하여 정 전류 회로를 공급하고 전압을 측정하는 박스에서 서미스터 센서까지의 거리는 10m, 정 전류는 1mA, 하니스의 종류는 22 AWG와 26 AWG 두 가지 경우로 가정하여 분석하였으며 그 결과를 표 2에 정리하였다. 분석 결과 22AWG 하니스를 사용할 경우 10m 거리에서 약 1mV 정도의 전압 강하가 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 4-wire 방식 사용이 불가하거나 용이 하지 않아 2-wire 방식을 사용하는 경우 하니스 gauge를 높여 하니스 저항을 줄임으로써 전압 강하 오차를 최소화 할 수 있으며 또한 측정 정확도를 개선할 수 있다. 실제 적용을 위해서는 측정 정확도 요구 조건을 검토한 후 두 가지 방식 중 하나를 선택하여야 하며 만약 2-wire 방식을 사용할 경우 요구 조건에 맞게 하니스를 적절히 선택하여야 한다.

표 2. 하니스 손실에 의한 오차

하니스 종류 오차 항목	22AWG	26AWG
단위 저항 (Ω/m)	57.4E-3	147E-3
접촉 저항 (Ω)	0.02	0.02
하니스 길이 (m)	10	10
전체 저항 (Ω)	1.168	2.96
전압 오차(mV)	1.168	2.96

3. 온도 측정 정확도 추정

지금까지 서미스터를 이용하여 온도 측정을 할 경우 발생 가능한 오차 요인들에 대하여 알아보았다. 앞서 언급한 오차 요인들을 모두 고려하여 최악 조건 분석(Worst Case Analysis)을 수행

니스를 사용하는 것으로 가정하고 분석하였다.

표 3에서 왼쪽에서부터 온도(T), 서미스터 저항값(R), 그리고 이상적 전압(perfect(V))을 나타낸다. 이상적 전압값은 63 μ A stimulus 전류와 서미스터 저항값과의 산술적 곱에 의해 주어진다. 그 다음 칼럼은 안정도 오차에 의해서 발생한 오차 전압, 노이즈에 의한 오차 전압, 그리고 하니스 저항에 의한 오차 전압값을 각각 나타내는 칼럼이며 이러한 오차 요인들의 합과 이상적인 전압의 합이 실제 측정되는 전압(Measure(V))으로 가정하였으며 이러한 측정 전압을 선형보간법을 사용하여 온도로 변환한 것을 측정온도(Measure(C)) 칼럼에 나타내었다. 최종 온도 오차는 가장 좌측의 온도와 선형보간법에 의해 구해진 온도와의 차이, 그리고 온도 센서 자체의 드리프트에 의한 0.01 $^{\circ}$ C 정도 오차를 고려하여 가장 오른쪽 칼럼에 나타내었다.

표 3에서 알 수 있듯이 오차 요인 중 정 전류

표 3. YSI-10 서미스터의 온도 측정 정확도 분석

T (C)	R (kohm)	perfect (V)	stability error (V)	noise error (V)	harness error (V)	total error (V)	Measure (V)	slope (C/V)	slope (ohm/C)	slope (V/C)	Measure (C)	drift error (C)	error (C)
-25	359.6	22.65	0.11	0.010	1.56E-04	0.123	22.778	-0.8978	-17680	-1.114	-25.081	0.01	0.091
-20	271.2	17.09	0.09	0.010	1.56E-04	0.096	17.181	-1.2210	-13000	-0.819	-20.086	0.01	0.096
-15	206.2	12.99	0.06	0.010	1.56E-04	0.075	13.066	-1.6466	-9640	-0.607	-15.092	0.01	0.102
-10	158.0	9.95	0.05	0.010	1.56E-04	0.060	10.014	-2.2107	-7180	-0.452	-10.099	0.01	0.109
-5	122.1	7.69	0.04	0.010	1.56E-04	0.049	7.741	-2.9264	-5424	-0.342	-5.107	0.01	0.117
0	95.0	5.98	0.03	0.010	1.56E-04	0.040	6.024	-3.8639	-4108	-0.259	-0.117	0.01	0.127
5	74.4	4.69	0.02	0.010	1.56E-04	0.034	4.723	-5.0583	-3138	-0.198	4.870	0.01	0.140
10	58.8	3.70	0.02	0.010	1.56E-04	0.029	3.730	-6.5700	-2416	-0.152	9.855	0.01	0.155
15	46.7	2.94	0.01	0.010	1.56E-04	0.025	2.965	-8.4701	-1874	-0.118	14.837	0.01	0.173
20	37.3	2.35	0.01	0.010	1.56E-04	0.022	2.372	-10.8719	-1460	-0.092	19.814	0.01	0.196
25	30.0	1.89	0.01	0.010	1.56E-04	0.020	1.910	-13.8508	-1146	-0.072	24.787	0.01	0.223
30	24.3	1.53	0.01	0.010	1.56E-04	0.018	1.547	-17.5199	-906	-0.057	29.753	0.01	0.257
35	19.7	1.24	0.01	0.010	1.56E-04	0.016	1.260	-22.1073	-718	-0.045	34.713	0.01	0.297
40	16.2	1.02	0.01	0.010	1.56E-04	0.015	1.033	-27.6533	-574	-0.036	39.663	0.01	0.347
45	13.3	0.84	0.00	0.010	1.56E-04	0.014	0.851	-34.3572	-462	-0.029	44.603	0.01	0.407
50	11.0	0.69	0.00	0.010	1.56E-04	0.014	0.705	-42.6465	-372	-0.023	49.532	0.01	0.478
55	9.1	0.57	0.00	0.010	1.56E-04	0.013	0.587	-52.5597	-302	-0.019	54.445	0.01	0.565
60	7.6	0.48	0.00	0.010	1.56E-04	0.013	0.491	-64.4197	-246	-0.016	59.340	0.01	0.670
65	6.4	0.40	0.00	0.010	1.56E-04	0.012	0.413	-78.7352	-202	-0.013	64.217	0.01	0.793

하였으며 각 오차 요인들의 최대 오차를 고려하여 온도 측정 시 얼마나 오차가 발생할 수 있는지 예측하고 이를 통하여 정확도를 추정하였다. 분석을 위하여 정 전류 회로의 출력 전류는 63 μ A, 안정도(stability) 1%, 서미스터 센서까지의 거리 6.5m, 측정 노이즈는 10mV로 가정하였으며 또한 서미스터는 YSI-10을 사용하며, 22AWG 하

회로의 안정도에 의한 전압 오차가 가장 크며 이는 측정 정확도에 가장 크게 영향을 미치는 요소를 알 수 있다. 표 3은 YSI-10 서미스터에 대한 정확도 추정이며 동일한 방법으로 YSI-06, YSI-08 모델에 대하여도 정확도 추정을 수행한 후 그 결과를 그림 5에 나타내었다.

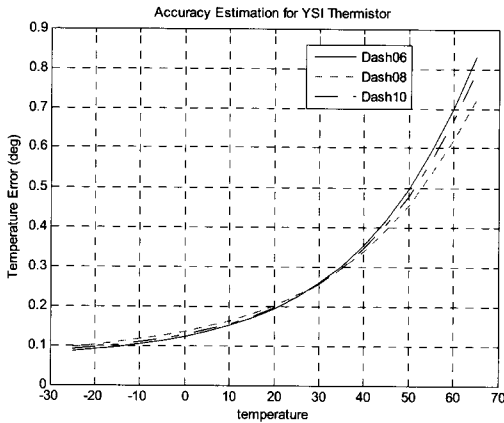


그림 5. YSI 계열 서미스터 정확도 추정

그림에서 알 수 있듯이 세 개의 서미스터가 비슷한 성능을 나타내고 있으며 또한 동일하게 측정 온도가 낮은 영역이 높은 영역에서 보다 더 정확한 측정이 가능한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 앞서 그림 1과 2에서 나타낸 YSI 서미스터 민감도 특성에서 알 수 있듯이 낮은 온도에서 민감도가 크기 때문에 정확도가 향상되는 것으로 판단된다.

4. 결 론

지금까지 인공위성 개발에 많이 사용하는 서미스터 온도센서의 측정 정확도를 분석하였다. 온도 측정에 영향을 미치는 여러 가지 오차 요인들을 정량적으로 분석하였으며 분석된 오차요인들을 모두 고려하여 최종 온도 측정 정확도 분석을 수행하였다.

분석 결과 온도 측정 시 정확도에 영향을 주는 요인으로는 정 전류 회로의 출력 전류 안정도, 하니스 저항에 의한 오차, 노이즈 오차 그리고 센서 자체의 드리프트 오차 등으로 파악되었으며 이중 가장 큰 오차 요인으로는 서미스터에 인가해 주는 정 전류 회로의 안정도인 것으로 파악되었다. 서미스터를 사용하여 고 정밀의 온도를 측정할 경우 서미스터에 인가하는 정 전류 회

로의 안정도가 전체 성능에 가장 큰 영향을 미치며 따라서 높은 안정도가 요구된다.

참 고 문 헌

1. W. J. Larson, J. R. Wertz, "Space Mission Analysis And Design".
2. A. S. Sedra, K. C. Smith, "Microelectronics Circuits".
3. <http://www.ussensor.com/company.html>
4. <http://www.ysitemperature.com/ind-probes.html>
5. <http://www.sensorsci.com/documentlib.htm>