

인듐안티모나이드(InSb) 소자를 이용한 적외선 방사온도 계측시스템의 개발 연구

황 병 옥,* 이 원 식,* 장 경 영**

Development of Radiation Thermometer using InSb Photo-detector

Byeong-Oc Hwang,* Won-Sik Lee* and Kyung-Young Jhang**

ABSTRACT

This paper proposes methodologies for the development of radiation thermometer using InSb photo-detector of which spectral sensitivity is excellent over the wave length range of $2\mu\text{m}\sim 5\mu\text{m}$. The proposed radiation thermometer has broad measurement range from normal to high, up to more than 1000°C , with high accuracy, and can measure temperature on the material surface or heat emission noncontactly with high speed. Optical system was consisted of two convex lens with focuslength of 15.2mm for infrared lay focusing, Ge filter to cut the short wave length components and sapphire filter to cut the long wave length components. The cold shielded was installed in the whole surface of the light-absorbing element to remove the error due to the surrounding emission. In order to confirm the performance of the developed thermometer, calibration using black body furnace which has temperature range of $90^\circ\text{C}\sim 1100^\circ\text{C}$ was carried out, and temperature calibration curve was obtained by exponential function curvefitting. The result shows maximum error less than 0.24% ($640\text{K}\pm 1.6\text{K}$) over the measurement range of $90^\circ\text{C}\sim 700^\circ\text{C}$, and from this result the usefulness of the developed thermometer has been confirmed.

Key Words : Radiation Thermometer(방사온도계), InSb Photo-detector(InSb 수광소자), Infrared Ray(적외선), Heat Emission(열방사), Temperature Calibration Curve(온도교정곡선)

1. 서 론

비접촉 온도계측 기술은 철강산업, 열처리산업, 에너지산업, 전자산업, 원자력산업, 항공우주산업, 자동차

산업, 의료산업, 자원탐사, 지구관측 등 기초산업에서 첨단산업에 이르기까지 광범위하게 응용되고 있는 중요 기반기술 분야로서 산업기술의 고도화 발전을 위해서는 응용분야에 적합한 적외선 방사온도 계측기술의 개발이

* 국립공업기술원

** 한양대학교 정밀기계공학과

필수적으로 요청되고 있다. 특히 선진국에서는 최근 특수용도의 고속측정, 측정환경을 고려한 분광측정, 2차원 온도분포를 측정하기 위한 적외선 영상시스템 및 다점소자를 이용한 2차원 온도분포의 고속 정밀측정 등 기술선점을 위한 다양한 기술개발이 진행되고 있으나 국내에서는 아직 적외선 방사계 또는 방사온도계가 국산화 개발되지 못한 상태에 있으며, 방사온도계의 산업 현장 활용기술도 확보되지 않아 측정기술도 매우 낮은 수준에 머물러 있다.

본 연구에서 개발한 양자형의 인듐안티모나이드(InSb) 수광소자와 광학계를 이용한 일직고속 정밀측정용 방사계는 2차원 온도분포의 측정용 또는 위성 관측용 등으로 사용되고 있는 적외선 영상시스템의 전단계로서 한정된 수요와 용도의 특수성 때문에 세계적으로 아직 상품화, 일반화되지 못한 단계에 있다. 따라서 레이저섭광법에 의한 열물성의 정밀측정 등을 위해서는 고속 정밀측정 및 컴퓨터로의 데이터 전송이 가능한 방사온도계 또는 방사온도 계측시스템의 자체개발이 요청되었으며, 개발된 방사온도 계측시스템은 레이저섭광법에 의한 다중물성 측정용으로 적합한 것으로 확인되었다.

2. 방사온도 계측시스템의 설계

2.1 측정원리

온도 $T(K)$ 의 흑체가 전 파장영역에 대하여 단위면적, 단위시간당 나오는 열방사인 방사강도 W 는 스테판 볼츠만의 법칙에 따라 다음과 같이 표시된다.⁽¹⁾

$$W = \sigma T^4 \quad (1)$$

여기에서 σ 는 스테판 볼츠만의 상수로

$$\sigma = (5.67032 \pm 0.00071) \times 10^{-8} \cdot W \cdot m^{-2} k^{-4}$$

이다.

또한 열평형 상태에 있는 절대온도 $T(K)$ 인 흑체가 방출하는 분광방사강도는 프랭크식에 따라 다음과 같이 표시된다.⁽²⁾

$$L_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\pi \lambda^5} (e^{C_2/\lambda T} - 1)^{-1} \quad (2)$$

여기에서

$L_{\lambda,b}(\lambda, T)$: 분광방사강도

λ : 파장

T : 절대온도

C_1 : 방사 제1상수 $(3.741832 \pm 0.000020) \times 10^6$
 $W \cdot m^2$

C_2 : 방사 제2상수 $(1.438768 \pm 0.000045) \times 10^2$
 $m \cdot K$

이다.

식 (2)에서 어떤 임의의 파장에서의 분광방사강도 $L_{\lambda,b}(\lambda, T)$ 를 정확히 알면 흑체의 온도를 구할 수 있다. 그러나 실제로는 분광방사강도의 절대치를 측정하는 것은 매우 어렵기 때문에 흑체를 이용한 비교 교정방법을 이용하며, 백금저항 온도계 또는 표준열전대에 의한 흑체로의 지시온도와 흑체로에 대한 방사 온도계의 출력사이의 관계식을 지수함수적으로 구하여 이를 방사온도계의 온도보정식으로 사용함으로써 온도측정이 가능하다.

2.2 센서의 선정

방사온도 계측용 센서는 용도, 측정온도, 측정속도, 측정분위기 등에 따라 수많은 재료가 개발되어 있지만, 레이저섭광법용 방사온도계는 수밀리초(ms) 내에 변화되는 시료의 온도변화를 정밀측정할 수 있어야 하기 때문에 시간분해능이 10⁻³초 이내이어야 하며, 복합재료, 우주산업용 재료, 원자력산업용 재료 등 특수재료의 물성측정을 위해서는 온도측정 범위가 상온~2000℃ 정도가 되어야 한다. 또한 대기중의 수증기나 탄산가스는 흡수가 강한 파장대가 넓은 외에도 온도 변화에 의한 흡수율의 변화가 크므로 측정치의 재현성이 나빠지거나 측정이 불가능하게 될 수 있기 때문에 대기중의 탄산가스 및 수증기에 의한 흡수가 적어 대기의 창이라고 일컫는 파장대역인 3~4μm 또는 8~12μm에서 감도가 높아야 하며 교정곡선을 이용한 정밀 온도측정이 가능하여야 한다.⁽³⁾

위와같은 조건에 적합한 센서로는 인듐안티모나이드(InSb)와 수은카드뮴텔레루라이드(HgCdTe)가 있으며, 측온범위, 산업화 응용을 위한 파장대역의 효율성 등을 고려하여 인듐안티모나이드(InSb) 센서를 선택하였다.⁽⁴⁾

인듐안티모나이드 센서는 액체질소로 냉각함으로써 1~5μm대에서 가장 높은 감도를 얻을 수 있는 양자형 단결정 반도체 소자로서 미국, 일본 등 선진국에서 이미 특수용 광학센서로서 개발되어 판매되고 있기 때문에 본 연구에서는 일본의 하마마쓰 모델 P5172-060을 구입하여 사용하였으며 주요 사양은 다음과 같다.

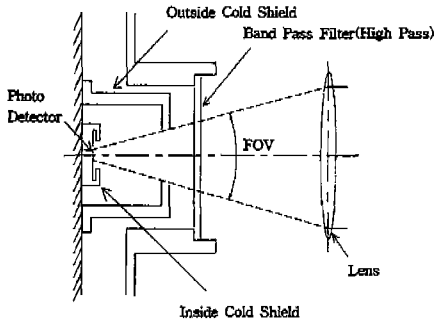


Fig. 1 Design of radiometer optics

- 출력신호 종류: 광기전력 소자
- 수광면 크기: $\phi 0.6\text{mm}$
- 소자의 온도: -196°C
- 최대감도 파장: $5.3\mu\text{m}$
- 컷오프 파장: $5.5\mu\text{m}$
- 상승시간 (63%): $1\mu\text{s}$
- 창재료: 사파이어
- 보존온도: $-20\sim 60^\circ\text{C}$

2.3 광학계의 설계

방사온도 계측시스템의 광학계는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 크게 대물렌즈와 사파이어필터, 주위방사 차폐기구, 검출소자의 수광면으로 구성되며, 인듐안티모나이드 센서의 감응특성이 좋은 $2\sim 5\mu\text{m}$ 의 파장대역에서 분광방사를 측정하기 위하여 대물렌즈의 재료는 게르마늄을 사용하고 $2\sim 5\mu\text{m}$ 파장에 대하여 무반사코팅을 하여 투과율을 높였으며, 방사계 출력의 비례특성을 향상

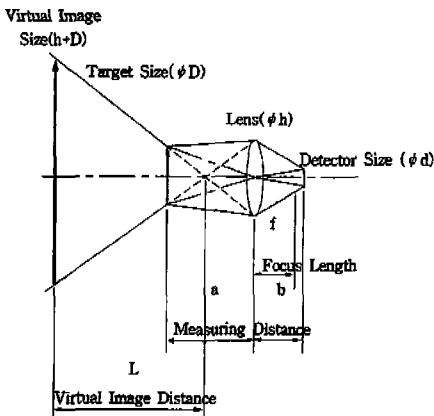


Fig. 2 Relation between target size and measuring distance

시키기 위하여 $2\mu\text{m}$ 이하의 파장은 게르마늄(Ge) 렌즈를 이용하여 차단하고, $5\mu\text{m}$ 이상의 파장은 사파이어 창을 이용하여 차단토록 하였다.⁽⁶⁾

방사온도계의 광학계 설계는 측정 대상물로부터 방사온도계까지의 거리, 측정파장, 측정면적의 크기 등에 따라 종합적으로 검토 설계되어야 하며, Fig. 2는 광학계의 설계방법을 나타내고 있다. 지금 측정 대상물에서 방사온도계의 대물렌즈까지의 거리(측정거리)를 a, 대물렌즈에서 검출소자의 수광면까지의 거리(렌즈거리)를 b, 대물렌즈의 초점거리를 f, 검출소자의 수광면의 크기를 d, 측정 대상물의 측정면의 크기(면적분해능)를 D 라고 하면, 이들 사이에는 다음의 관계식이 성립한다.⁽⁶⁾

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}, \quad \frac{D}{d} = \frac{a}{b} \quad (3)$$

$$\therefore D = \left(\frac{a}{f} - 1\right)d \approx \frac{d}{f}a \quad \text{거리계수} = \frac{a}{D} = \frac{f}{d} \quad (4)$$

즉, 대물렌즈를 이동시킬 수 있는 가동초점형에서는 핀트가 맞추어졌을 때의 핀트면에서 최소의 측정면적을 가지게 되며, 측정면의 크기는 측정거리를 거리계수로 나눈 값에 해당한다. 반면에 대물렌즈의 위치를 고정하고 고정초점형은 설계시에 결정된 고유의 특성을 갖게 된다. 본 연구에서는 가동초점형으로 하여 검출소자로부터 $180\sim 220\text{mm}$ 의 범위내에서 렌즈가 이동 가능하도록 설계함으로써 측정거리는 $470\sim 900\text{mm}$ 까지 되며, 초점거리 150mm 의 대물렌즈의 사용으로 피측정물의 측정대상 면적(Target Size)은 $1.3\sim 3\text{mm}$ 가 된다. Table 1은 수광면의 크기가 직경 0.6mm 인 경우 렌즈의 초점거리, 피측정물까지의 거리 및 피측정물의 크기의 관계를 나타내고 있다.

2.4 방사온도 계측시스템의 구성

본 연구에서 개발한 적외선 방사온도 계측시스템은 측정대상물의 열방사를 집광하고 필요로 하는 특정 파장대를 선정하여 검출소자의 수광면에 입사시키기 위한 광학계와 수광면에 입사된 열방사량을 전기적 신호로 변환시켜 출력하는 검출소자 및 검출소자의 전기적 신호를 증폭 처리하여 표시하고 온도로 변환 처리하기 위한 데이터처리장치의 3개 부분으로 구성하였다.

Fig. 3은 방사온도 계측시스템의 구성도를 개략적으로 나타낸 것으로서 주요 사양은 Table 2와 같다.

Table 1. Target size related with focus length and measuring distance

F	S _{min}	Tar. size	S _{max}	Tar. size
100	183	0.50	225	0.75
110	220	0.60	283	0.94
120	264	0.72	360	1.20
130	318	0.87	468	1.56
138	370	1.01	591	1.97
140	385	1.05	630	2.10
150	471	1.29	900	3.00
160	587	1.60	1440	4.80
170	748	2.04	3060	10.20
175	856	2.33	6300	21.00
179	960	2.62	32220	107.40
179.9	987	2.69	323820	1079.40
180	990	2.70	∞	∞

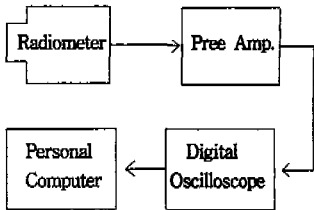


Fig. 3 Block diagram of radiation thermometry system

검출소자로부터의 출력신호의 필터링과 증폭효율을 최대화하기 위하여 검출소자 제작회사(Hamamatsu)에서 InSb 소자 전용으로 설계한 프리앰프를 사용하였으며, 방사계로부터의 데이터는 8비트 샘플링, 1메가바이트 메모리의 디지털 오실로스코프를 이용하여 저장 또는 지시도록 하였다. 오실로스코프에 저장된 피측정물의 방사강도에 대한 데이터는 컴퓨터에 전송되어 온도-출력 교정식에 의하여 온도로 변환 지시하게 되며, 방사강도에 대한 검출소자의 출력특성을 퍼스널컴퓨터

Table 2 Specification of InSb radiometer

Wave Length	2~5 μ m
Photo Detector	InSb(ϕ 0.6mm)
Lens	Ge f=15.2mm, ϕ 5.1mm
Lens Movement Range	180~220mm
Focusing Range	471.43~900mm
Target Size	1.286~3mm
Filter	Saphire
Cooling Type	LN2
Signal Output	0~12mV

로 분석하기 위하여 GPIB를 이용한 원격제어 데이터 취득프로그램을 개발하였다.

3. 성능 실험

3.1 샘플링 성능

방사온도계는 측정 대상물의 온도변화속도, 필요로 하는 온도의 측정속도 등에 따라 충분한 샘플링 성능(시간분해능)을 가져야만 한다. 특히 레이저섬광법에 의한 열물성 계측의 경우에는 펄스레이저의 흡수에 따른 시료의 온도상승이 불과 수밀리초(5~500ms) 동안에 완료되기 때문에 상승온도에 대한 1%의 분해능을 확보하기 위해서는 방사계의 샘플링 속도가 50 μ s 이내이어야 한다. 또한 오실로스코프, 컴퓨터 등에 의한 데이터 처리를 감안하고 측정정밀도를 보다 향상시키기 위해서는 10 μ s내외의 샘플링속도를 갖는 방사계를 사용하는 것이 바람직하다.

Fig. 4는 샘플링속도 시험결과를 나타낸 것으로서 샘플링속도의 시험은 코일지름 0.5mm정도의 텅스텐램프와 방사계 사이에 ϕ 5mm의 초퍼를 설치하고 반경 20mm의 위치에 ϕ 5mm의 구멍이 뚫린 회전판을 모터에 고정시켜 모터를 분당 19100회전의 속도로 회전시키면서 실시하였다. 광원으로부터의 방사는 초퍼를 통과하여 회전판의 구멍이 초퍼와 일직선상에 왔을 때 방사계에 입사되기 시작하여 회전판의 회전에 따라 입사량이 감소되게 되며, 이때의 방사계의 출력특성을 오실로스코프에 0.1 μ s의 속도로 데이터를 기록하였다. 오실로스코프에 의하여 얻어진 출력곡선중 출력상승 곡선은 방사계의 샘플링속도만큼 지연되는 반면 강하곡선은 지연특성이 나타나지 않기 때문에 상승곡선과 강하곡선의 시간차로부

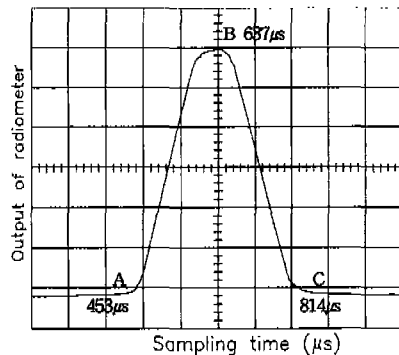


Fig. 4 Sampling time resolution of radiometer

터 샘플링속도가 구해지며 시험결과 5~10 μ s 정도로 확인되었다.

3.2 면적분해능

방사계의 면적분해능(Target size)은 기본적으로는 식 (4)에 의하여 산출되기 때문에 측정거리, 대물렌즈와 검출소자 사이의 거리, 검출소자의 수광면의 크기 및 대물렌즈의 초점거리에 의하여 결정되지만, 실제로 정밀측정용 방사계를 개발시에는 대물렌즈의 구면수차와 주위방사의 영향을 고려하여야만 한다. 특히 주위방사의 영향은 면적분해능뿐만 아니라 측정오차를 발생시키는 주요 요인이 되기 때문에 특수한 고안이 필요하며, 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 검출소자와 액체질소 냉각조의 외통사이에 직경 8mm의 측정구를 갖는 저온 차폐기구(외측 Cold shield)를 설치함으로써⁽⁷⁾ 주위방사에 의한 영향을 최소화시키고 정밀측정이 가능하도록 하였다. Fig. 5는 방사계의 면적분해능을 확인하기 위하여 흑체로와 방사계 사이에 폭 5mm의 슬릿과 직경 5mm의 초퍼를 일직선상에 설치하고 방사계를 좌우로 미세하게 이동시키면서 방사계의 출력특성을 측정함으로써 시험결과 면적분해능은 상승곡선 또는 강하곡선에 해당하는 이동거리인 ϕ 1.5mm 정도로 확인되었다. 이와 같이 면적분해능이 ϕ 1.5mm까지 가능하게 된 것은 검출소자의 외측에 2중으로 저온차폐기구를 설치하여 주위로부터의 방사를 차단하였기 때문이며 면적분해능의 획기적인 향상(ϕ 8mm내외에서 ϕ 1.5mm 내외로 향상)으로 온도분포의 정밀측정이 가능하게 되었다.

3.3 온도측정 성능

방사계는 내장된 적외선소자의 감용파장과 광학필터

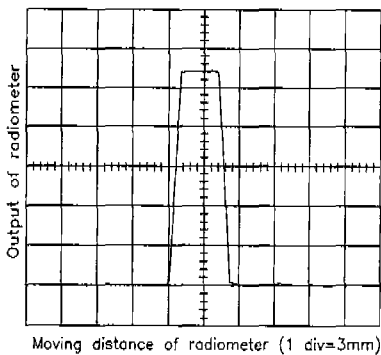


Fig. 5 Sampling area resolution of radiometer

또는 광학창에 의하여 일정 파장범위의 적외선만을 수광하고, 소자의 출력특성은 수광관에 흡수된 에너지에 비례하게 된다. 그러나 흡수된 방사에너지에 비례하는 소자의 출력특성으로부터 측정대상물의 온도를 측정하기 위해서는 방사율이 1인 흑체로를 이용하여 흑체로의 온도와 흑체로부터 입사된 방사에너지에 의한 소자의 출력치 간의 특성식을 얻어야만 방사계의 출력에 따른 온도눈금의 설정이 가능하며, 얻어진 특성식으로부터 측정 대상물의 온도를 산출할 수 있게 된다.

현재까지 발표된 대부분의 교정식은 플랭크의 이론을 기본으로 하여 지수함수화한 것이 대부분으로서 여러가지 형태의 교정식이 제안되었다.

예를 들면, Dr. Hattori와 Dr. Ruffino 등은 다음과 같은 방법으로 교정식을 구성하였다.⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾

$$V(T) = C \exp\left(-\frac{C_2}{AT+B}\right) \quad (5)$$

$$V(T) = C \exp\left(-\frac{A}{T} - \frac{B}{T^2}\right) \quad (6)$$

(A, B, C는 특정 상수, C₂는 플랭크 상수)

이 식들은 측정파장의 폭이 좁은 범위에서는 유효하지만 파장폭이 넓은 경우에는 정밀도가 급격히 떨어지는 것으로 알려져 있다. 또한 지수 n을 사용하여 (7)식과 같이 특성식을 구성하는 방법도 발표되었으나 하나의 특성식과 상수로 표현되는 온도폭이 좁기 때문에 많은 구역으로 온도범위를 분할하여야 하므로 사용에 불편한 단점이 있다.⁽⁸⁾

$$V(T) = \alpha T^n \quad (7)$$

본 연구에서는 1987년 일본 계량연구소의 Dr. Ono 등이 지구관측용 위성에 탑재할 적외선 온도계의 정밀교정을 위하여 제안한 다음식을 사용하여 교정곡선을 구하였다.⁽⁹⁾

$$V(T) = C \cdot T^B \exp\left(-\frac{A}{T}\right) \quad (8)$$

A, B, C: 교정상수

$$A = \frac{1n \frac{T_1}{T_3} \cdot 1n \frac{V_2}{V_3} - 1n \frac{T_2}{T_3} \cdot 1n \frac{V_1}{V_3}}{\left(\frac{1}{T_3} - \frac{1}{T_2}\right) \cdot 1n \frac{T_1}{T_3} - \left(\frac{1}{T_3} - \frac{1}{T_1}\right) \cdot 1n \frac{T_2}{T_3}}$$

Table 3 Temperature calibration constants

Temp. Range(K)	A	B	C
360~580	3.2802×10^8	1.3936×10^4	1.2405×10^8
560~930	2.6002×10^8	1.4052	1.0954×10^8
870~1370	2.1467×10^8	1.8458	8.1593×10^8

$$B = \left\{ \ln \frac{V_2}{V_3} + A \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_3} \right) \right\} / \ln \frac{T_2}{T_3}$$

$$C = V_1 \cdot T_1^{-B} \cdot \exp \frac{A}{T_1}$$

소자에 입력되는 방사에너지가 프리엠프에서 증폭가능한 최대범위를 초과하는 경우에는 측정이 불가능해지므로 측정 온도범위에 따라 소자에 입사되는 방사에너지량을 조절할 수 있도록 적절한 조리개를 사용하여야 한다. 본 연구에서는 두개의 조리개를 사용하여 일반적인 목적에서의 측정범위인 1370K 이하의 온도범위에서만 교정을 하였으며, 보다 고온의 측정을 필요로 할 때에는 투과율이 낮은 필터 또는 적절한 조리개를 사용하면 된다.

교정에 사용된 흑체로는 방사율이 0.995 이상이고 내부온도를 백금저항 온도계에 의하여 지시하는 Chino사의 중온용 흑체로를 사용하였다. 교정온도 구간은 프리엠프의 증폭범위를 고려하여 360~580K, 560~930K 및 870~1370K의 3단계로 온도범위를 분할하여 360~1370K까지 교정을 실시하였다.

Table 3은 측정실험에 의하여 얻어진 식 (8)의 온도

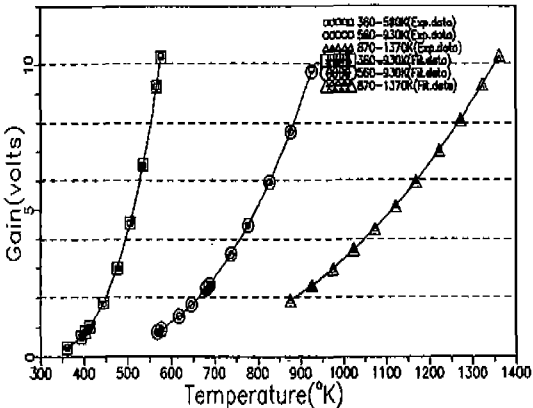


Fig. 6 Temperature calibration curve in range of 360~1370K

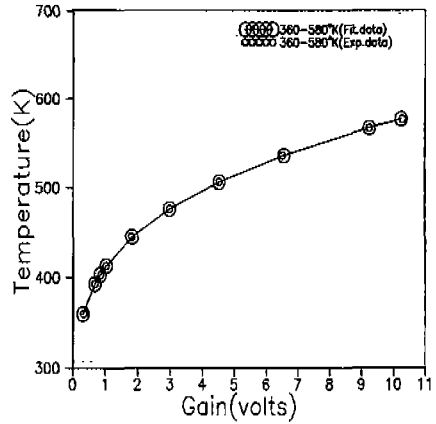


Fig. 7 Temperature calibration curve in range of 360~580K

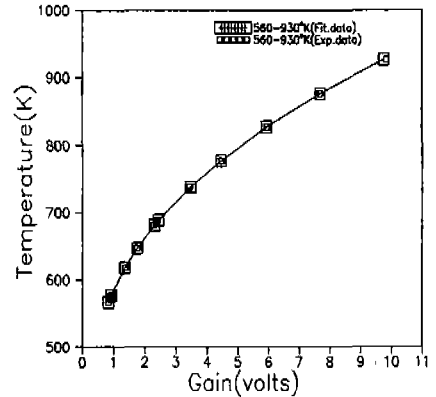


Fig. 8 Temperature calibration curve in range of 580~930K

구간별 교정상수를 나타내고 있으며, Fig. 6~Fig. 9는 각 온도구간별 측정데이터와 교정곡선과의 비교를 나타낸 것으로서 두 데이터가 근접하고 있음을 알 수 있다.

교정곡선에 의한 산출온도와 흑체로의 지시온도와와의 온도편차는 교정범위별로 360~580K범위에서는 최대 0.93K (0.19%), 560~930K범위에서는 최대 0.96K (0.19%), 870~1370K범위에서는 최대 1.6K (0.24%)의 편차를 나타내었다.

이와같은 교정곡선의 최대편차는 교정구간의 경계부에서 발생하고 있으므로 보다 정밀한 측정을 필요로 할 때에는 교정구간의 중첩부를 확대시켜 편차가 작은 온

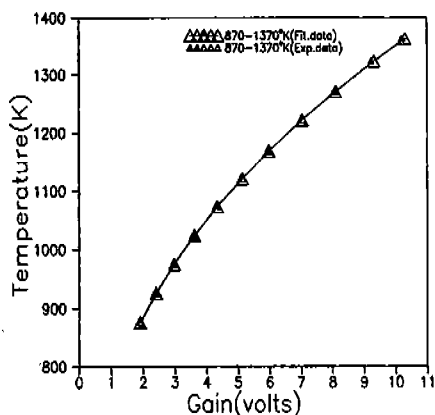


Fig. 9 Temperature calibration curve in range of 870~1370K

도범위로 구성된 교정곡선을 구하면 된다.

본 연구에서는 흑체로와의 비교를 통하여 교정곡선을 구하였기 때문에 측정대상물의 분광방사율이 1인 경우에만 현재의 교정곡선의 적용이 가능하며 일반 물체의 온도측정에 적용하기 위해서는 교정식 속에 방사율을 함수로 포함시켜 구하고 측정 대상물의 분광방사율을 알아야만 한다. 따라서 개발한 방사계를 레이저섬광법(Laser Flash Method)에 이용할 때에는 시료의 온도를 기준으로 한 교정곡선을 구하여 시료표면의 온도변화를 측정하게 되며, 이때의 교정결과는 방사계의 특성상 흑체로와의 비교에 의한 현재의 교정결과(편차)와 거의 일치하게 된다.

4. 결 론

레이저섬광법에 의한 열물성 계측의 정밀도 향상과 다중물성 계측기술의 개발을 위하여 인듐안티모나이드(InSb) 적외선 수광소자를 사용한 2~5 μ m 파장의 고속 측정용 적외선 방사계를 개발하였으며 흑체로를 이용하여 360~1370K의 온도범위에서의 온도-출력 곡선을 교정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 초점거리 150mm의 게르마늄(Ge) 렌즈를 대물렌즈로 사용하고 검출소자 외부에 저온 차폐기구를 설치함으로써 면적분해능이 ϕ 1.5mm의 고정밀 측정이 가능하게 되었다.

2) 액체질소 냉각형 인듐안티모나이드(InSb) 수광소자를 사용하여 시간분해능 5~10 μ s의 고속측정이 가능

하였다.

3) 방사온도 계측시스템의 출력특성을 흑체로와 비교하여 출력-온도 교정 곡선을 지수함수로 구한 결과 측정온도범위 360~1370K에서 온도편차는 1.6K(측정온도의 0.24%) 이내로서 실험치와 잘 일치하는 교정결과를 얻었다.

4) 본 연구에서는 온도 교정구간을 360~580K, 560~930K 및 870~1370K의 구간으로 분리 교정하였으나 교정구간을 보다 세분화시킬 경우 측정범위의 확장 및 교정곡선의 정확도 향상에 의한 온도측정의 정밀도 향상이 가능하다.

5) 본 연구에서 구한 교정곡선은 흑체로와의 비교측정에 의한 것으로서 레이저섬광법에 적용시는 실제 시료의 온도와 비교에 의한 교정곡선을 구하여 이용하면 시료의 방사율의 영향을 무시할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Robert Siegel and John R. Howell, 1992, Thermal Radiation Heat Transfer, pp.11-45.
2. Michael F. Modest, 1993, Radiative Heat Transfer, McGraw-Hill, pp.76-136.
3. E. G. Magison, 1989, Temperature Measurement in Industry
4. 熱物性, 1991, Vol.5, No.1, pp.12-16.
5. 宣洋來, 1982, 溫度의 計測, 科學評論社, pp.84-121.
6. Francis A. Jenkins and Harvey E. White, 1981, Fundamentals of Optics, McGraw-Hill, pp.60-65.
7. 小林正信, 小野, 高速應答連型 赤外放射計, 社團法人 電氣學會, 資料番號 LAN-88-5.
8. 溫度計測部會編, 1981, 溫度計測, 計測自動制御學會.
9. 佐久間史洋, 小野, 腹部, 1989, “放射溫度計의 特性式”, 計測自動制御學會論文集, Vol.23, No.8, pp.82-83.
10. G. Ruffino, 1984, “The Standard Radiation Thermometer of then NPRL-CSIR”, High Temp., High Pres., pp.393-402.