韓國産業應用學會誌, 제5권, 제3호, 173-178, 2002.8
J. Korean Society of Industrial Application, Vol.5, No.3, 173-178, Aug, 2002

제철소 적응형 복사온도계 개발
Development of a radiation thermometer for the adaptive steel plant

박상국*
Sang-Gug Park*

<Abstract>

In this research, we have worked about the radiation thermometer which can be applied to the hazard circumstance such as steel plant. In the results, we have developed radiation thermometer of a measuring range 500-1500℃, accuracy ±0.1%, repeatability ±0.1%, resolution 0.2℃. We performed extensive field test for 6 months at the hot strip mill in steel plant. Through the test, we have confirmed the reliability of the developed pyrometer.

Key Word : Radiation thermometer, Thermometer, Temperature measurement, Pyrometer

1. 서 론

제철소와 같은 유해한 환경에서 복사온도계는 온도를 계측하는 중요한 수단 중의 하나이다. 이는 제철소와 같은 철강산업에서는 공정 특성상 소재가 연속적으로 움직이면서 공정이 이루어지는데 이 경우에는 움직이는 소재의 온도를 측정하기 위해서는 비접촉식 방식에 의한 온도측정이 불가피하다. 지금까지 복사온도계는 비접촉식으로 온도를 계측한다는 장점이 있는 반면에 측정 정밀도에 대한 신뢰성에는 많은 의문을 제기하는 경우가 많았다.

그러나 복사온도계의 동작원리를 잘 이해하는 경우에 이 문제에 대해서 쉽게 이해할 수가 있다.

현재 국내의 제철소 대다수공정에서 사용하고 있는 복사온도계는 단색 복사온도계이며 열연 및 후판 공장에서도 단색 복사온도계를 사용하고 있다. 단색 복사온도계의 경우에 측정 대상체에서 방사되는 복사에너지를 측정하여 온도를 계측하게 된다[1]. 복사에너지가 측정 대상체로부터 방사되어 전파될 때 가장 직접적으로는 측정 대상체인 소재 표면의 고유 방사율(emissivity)에 의해서 영향을 받게 되고 그 이후에는 복사에너지가 전파되는 경로상에 존재하는 투과매질의 투과율에 의해서 영향을 받게 된다. 가장 이상적인 경우는 복사에너지가 전파되는 경로상에 아무것도 존재하지 않는 진공상

* 정회원, 위덕대학교 컴퓨터공학과 교수, 工博
경북대학교 대학원 졸업
경북 경주시 강동면 유금리 산50
054-760-1656 / 011-827-8432
E-mail: skpark@mail.uiduk.ac.kr

Dept. of Computer Engineering, UIDUK University
Ph.D.
Kyung Pook National University
#50 Yu-Gum Kang-Dong Kyung-Ju City Kyung-Puk

태가 가장 이상적이겠지만 온도를 계측하고자 하는 대상체 주변의 환경상 그러한 경우는 현실적으로 불가능하다. 이 때문에 복사에너지 전파 경로상에 존재하는 간섭물질에 대한 정확한 이해가 선행되어야만 정확한 온도측정이 가능하게 된다.

그 동안 복사온도계에 대한 국산화 실적은 전무한 상태이며 전량 수입에 의존해오고 있는 실정이다. 이런 상황은 복사온도계에 대한 수입 의존도와 수입 가격의 증대를 가져왔고 특정 환경에 적응하기 위한 대처능력이 부족하다는 문제점을 가지고 있다. 또한 시판되는 복사온도계는 측온 범위가 제한되어 있기 때문에 제철소의 열연 강판공정 등과 같이 온도범위가 넓은 측온체에 대해서는 한 대의 복사온도계 만으로는 온도대역을 커버하기 힘들기 때문에 한 공정에 여러 대의 온도계를 설치해야 하는 문제점을 가져왔다. 이는 온도계측에 소요되는 비용을 증대시킬 뿐 아니라 임계구간에서 정확한 온도계측이 이루어지지 않는 관계로 품질의 질을 저하시키는 요인이 된다.

본 연구에서는 제철소와 같은 특수환경에 적용하기 위한 범용 복사온도계의 국산화를 목적으로 광대역 측온방법에 대해서 연구했고 기존의 복사온도계가 가지는 정비성과 활용성의 문제를 개선시켰다. 연구결과 측온 범위 500-1500℃, 측정정밀도 ±0.1%, 온도 재현성 ±0.2% 이고 분해능이 0.2℃인 범용 복사온도계를 개발했다. 개발된 복사온도계에 대해서 검. 교정 장치를 통해 교정을 실시한 후 제철소 열연 공정 라인에 약 6개월 이상 설치하여 측정 정도 및 신뢰성 테스트를 했다. 테스트결과 만족할 만한 신뢰성과 정도가 확보되었음을 확인했다.

2. 이론적 배경

물체가 방사하는 복사 에너지는 그 물체가 갖고 있는 온도에 직접적으로 관계되기 때문에 물체에서 방사되는 복사 에너지만 잘 측정하면 그것으로부터 쉽게 그 물체의 온도를 계산할 수 있다. Fig. 1은 빛의 파장과 흑체에서 방사되는 복사에너지와의 관계를 나타낸 그래프로서 Plank의 흑체 복사법칙을 잘 설명해 준다. 식 (1)은 Plank의 흑체 복사법칙을 나타내는 수식이다[1,2].

$$E\lambda, b(\lambda, T) = \frac{C1}{\lambda^2[\exp(\frac{C2}{\lambda T})-1]} \qquad (1)$$

여기서 $E_{\lambda,b}$는 흑체 분광 방사력을, $C1$, $C2$는 제1, 제2 복사상수를 각각 나타낸다. 그리고 복사온도계 출력 V는 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$V = k\varepsilon \int E_{\lambda,b}(\lambda, T)R(\lambda)d\lambda \qquad (2)$$

여기서 λ는 측정파장, k는 복사에너지를 전압으로 변환하는 변환계수, $R(\lambda)$는 광 검출소자의 분광 감응도, ε는 방사율을 나타낸다.

그런데 우리가 측정 대상으로 하는 대부분의 물체는 Planck의 흑체 복사법칙에서와 같은 이상적인 방사체(혹은 완전 방사체)인 흑체를 대상으로 하지 않고 있다. 이 때문에 같은 온도에서 흑체의 복사에너지와 실제 물체에서의 복사에너지의 비로서 표현되는 그 물체의 방사율에 대한 정보를 정확히 알고 있어야 만이 그 물체의 온도를 정확히 계산할 수 있다.

따라서 앞에서의 Planck 흑체 복사법칙을 나타내는 식(1)을 실제 물체에 대해서는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_\lambda(\lambda, T) = \varepsilon_\lambda E_{\lambda,b}(\lambda, T) \qquad (3)$$

여기서 ε_λ는 실제물체의 분광방사율(Spectral emissivity, 0-1), E_λ는 실제물체의 분광방사력, $E_{\lambda,b}$는 흑체의 분광 방사력을 나타낸다. 식(3)은 실제물체에서 방사되는 복사 에너지에 대한 이론적 상관관계를 나타내며, 이때의 실제물체의 분광 방사율 ε_λ는 실제 측정물체의 온도, 표면조도와 색깔, 측정 파장대역, 측정물질, 측정물체의 방사각, 측정분위기 등에 따라 변하는 물리량이다[1,2,3].

식(3)의 분광방사율 ε_λ는 앞에서 설명한 것과 같이 다양한 측정조건에 의해서 영향을 받

는 인자이다. 본 연구에서는 분광방사율의 설정값을 현재 제철소에서 기준으로 사용하고 있는 0.85를 설정하여 사용함으로써 기존의 다른 복사온도계와 일관성을 유지하도록 했다.

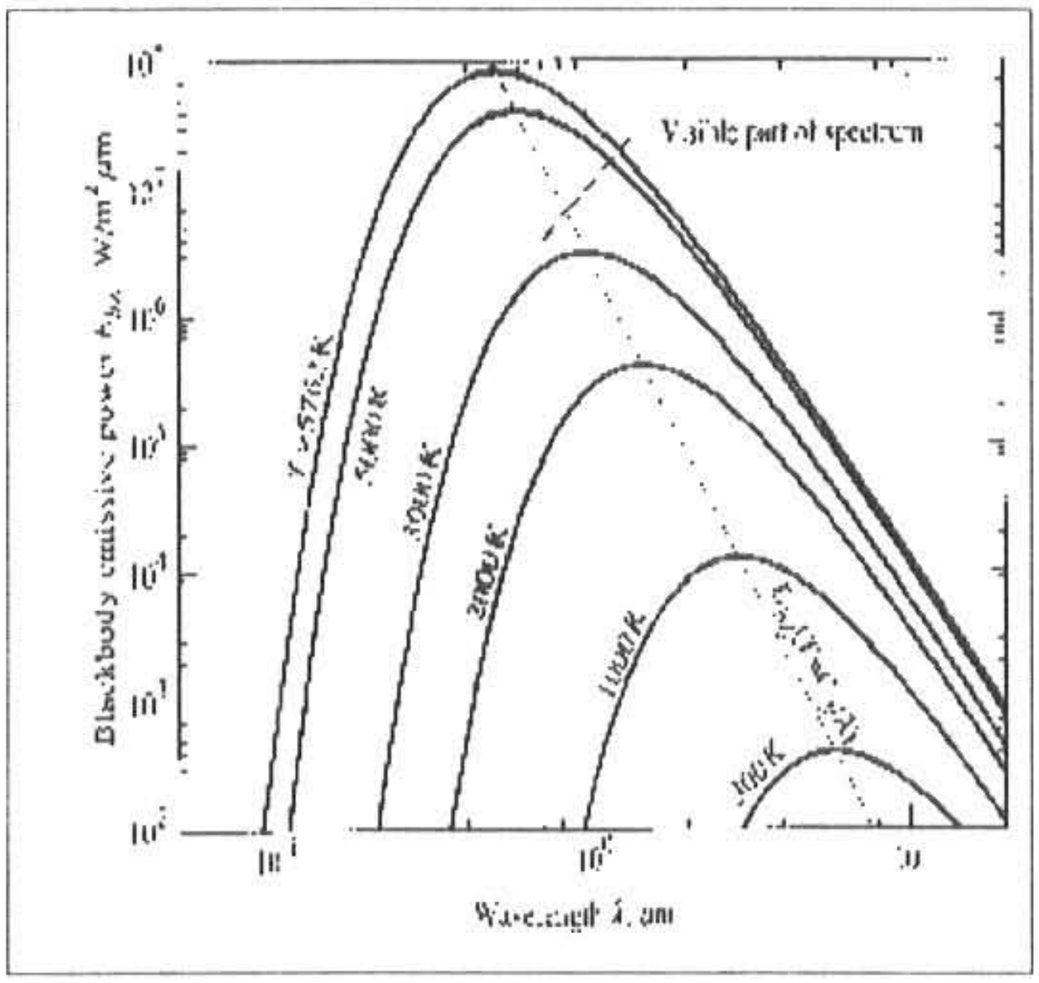

Fig. 1 Graph of a wavelength vs. blackbody emissive power

3. 복사온도계 설계 및 제작

3.1 전체 시스템 구성

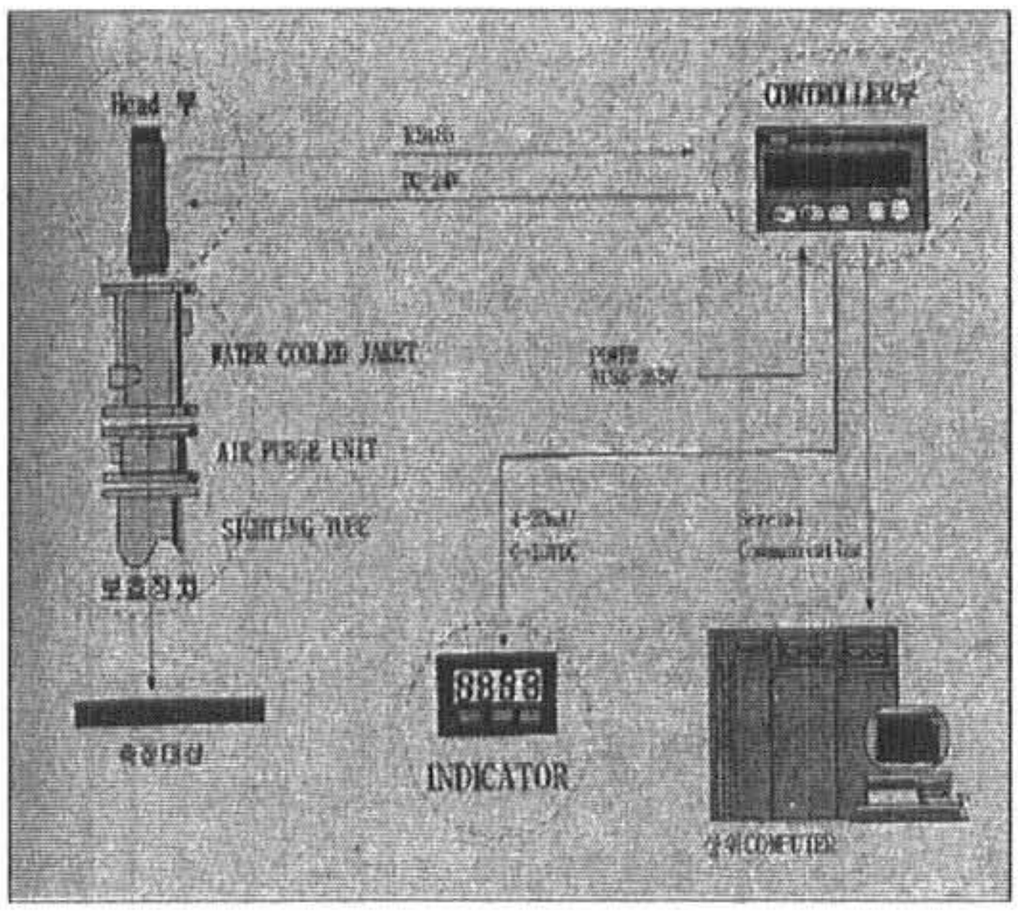

Fig. 2 Overall system configuration of a pyrometer

본 연구에서 개발한 복사온도계의 전체 시스템은 복사온도계 본체부, 메인 컨터롤러 및 표시부, 복사온도계 보호장치 그리고 관련 소프트웨어부로 구성된다. Fig. 2에 복사온도계의 전체 시스템 구성도를 나타냈다. 본체부는 측정물체로부터 방사되는 복사에너지를 측정하여 이를 전기적 신호로 변환하고 변환된 신호를 통해 메인 컨터롤러 및 표시부로 장거리 전송시키는 기능을 가진다. 이는 복사에너지를 수광하기 위한 수광부와 수광된 복사에너지를 전기적인 형태로 변환하여 전송하는 광 검출부로 나누어진다. Fig. 3에 본체부의 전체 시스템 구성도를 나타냈다. 대물렌즈는 측정파장 대역에서 복사에너지 투과효율을 높이기 위해 렌즈 양 표면에 Anti reflection coating 처리를 했다. 사용한 렌즈는 Bi-convex lens로서 직경 38mm, 초점거리 49.3mm로서 광학재질은 BK7을 사용했다. BK7은 본 연구에서 측정파장 대역으로 선정한 1um 부근에서 광학적 투과특성이 우수했다. 조리개는 수광되는 복사에너지의 양을 조절하는 역할을 하는 것으로 조리개의 구경과 조리개의 위치를 적절하게 조절하면 수광되는 복사에너지의 입체각(Solid angle) 크기를 조절할 수 있다.

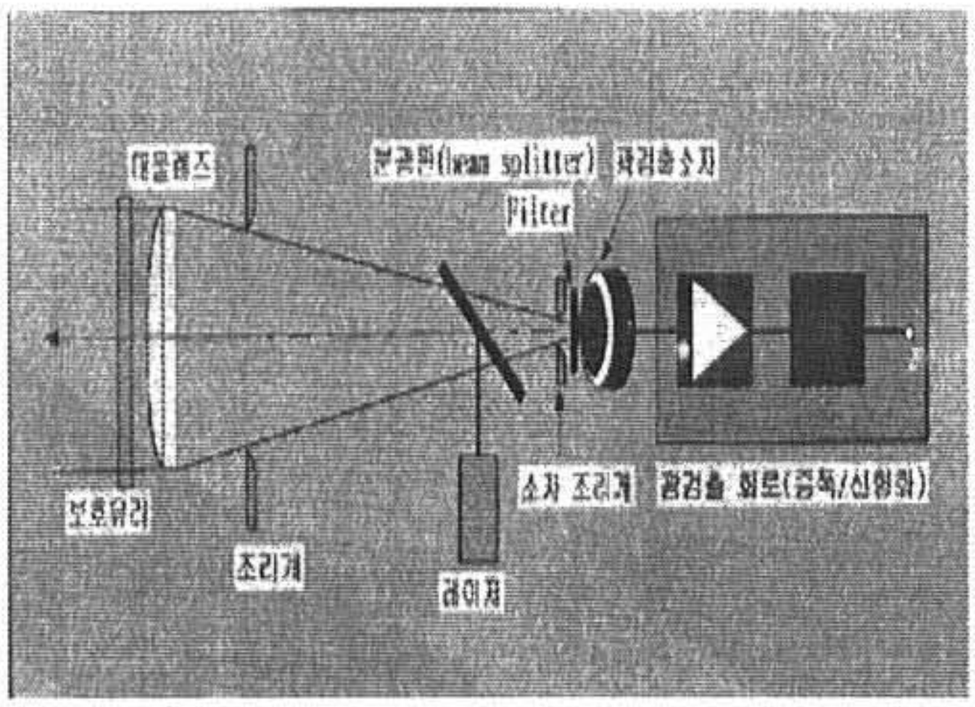

Fig. 3 Head part system configuration of a pyrometer

분광판은 45° 경사지게 위치시켜 파장이 670nm 이하인 복사에너지는 수직방향으로 반사하고 1000-1600nm 파장대역의 복사에너지는 수평하게 투과되도록 했다. 또한 분광판은 이것과 수직한 위치에 있는 레이저에서 방사되는 중심파장 670nm의 레이저광을 수평축에 평행하게 전면으로 반사시키는 역할을 한다. 본 연구에서 사용한 분광판은 Long wave pass dichronic mirro로서 크기 1"×1"인 CVI제품이다. 레이저는 온도계측을 하고자 하는 지점을 정확히 조

준하기 위한 광축 조정을 목적으로 본 연구에서 채택한 방식이다. 사용한 레이저는 Power technology사의 모델로서 중심파장 670nm, 출력 1mw인 반도체 레이저이다.

소자조리개는 광검출기 바로 앞에 위치하며 이것의 크기에 대한 결정은 측정거리에 따른 복사온도계 표적크기(Field of view)의 변화를 고려해서 실험용 광학계와 현장 설치용 광학계가 동일한 표적크기를 갖도록 설계했다. 표적크기는 측정하고자 하는 대상 체로부터 어떤 위치에 복사온도계를 위치시켰을 때 복사온도계가 실제로 측정하는 표적의 크기를 나타내는 것으로 본 연구에서는 Fig.4와 같이 설계했다.

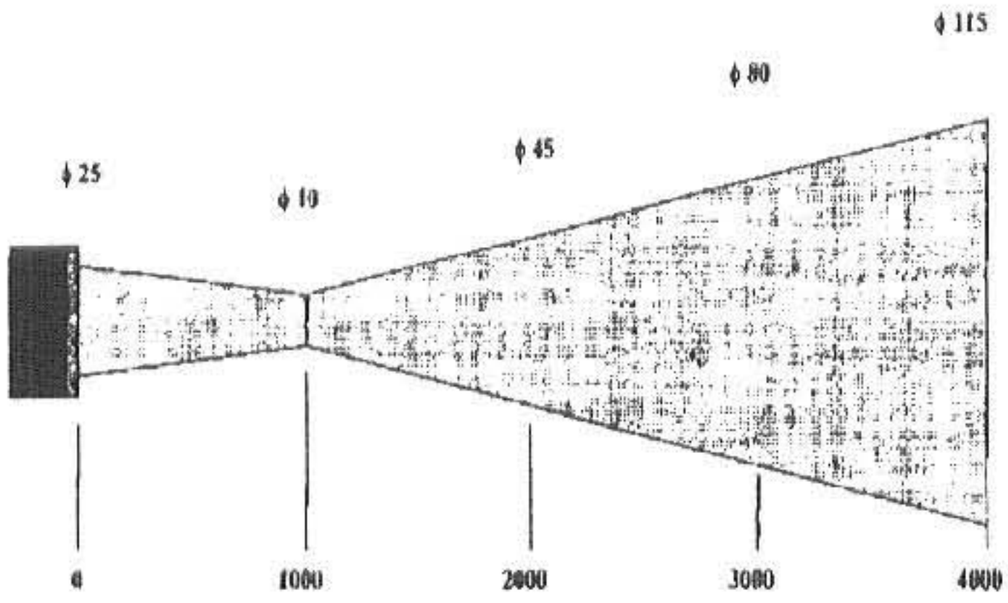

Fig. 4 The field of view of a pyrometer

3.2 본체부 광 검출회로

온도를 측정하고자 하는 목표물로부터 광학계를 이용하여 원하는 파장대의 광 신호를 받아들여서 이를 전기적 신호로 변환시키고 적절한 후처리 과정을 거쳐서 이를 장거리 전송시키기 위한 디지털 데이터로 변환시키는 기능을 가진 Head Unit 의 전체 시스템 구성도는 Fig.5와 같고 신호처리를 위한 순서도는 Fig.6과 같다.

그림에서와 같이 광 검출 소자인 적외선 센서로부터 출력되는 전기적 신호(=전류 신호)는 1차 증폭단에서 Gain-Selector에 의해서 선택된 이득 만큼 증폭이 된 전압신호(0-10V)로 변환되고 2차 증폭 단에서 신호 안정화를 위한 회로를 거치게 된다. 2차 증폭 단으로부터 출력되는 온도에 대해 비 선형곡선의 전압신호(0-10 V)는 다음 단의 Log-Amplifier에 의해서 선형화된 전압신호(-4 - +2 V)로 변환되고 이 신호를 TTL-IC 소자의 동작 전압으로 변환시키기 위해서 DC-Level 변환기로 입력된다.

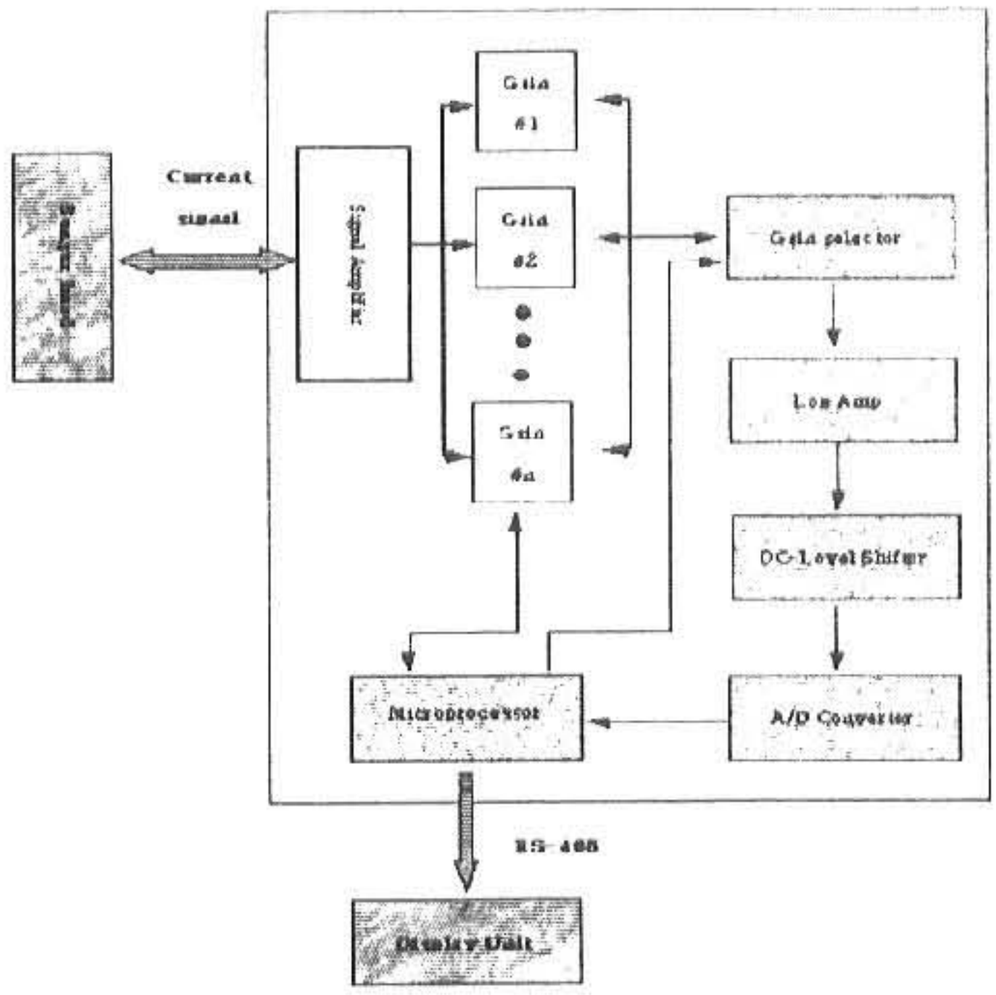

Fig. 5 Overall system configuration of a head unit

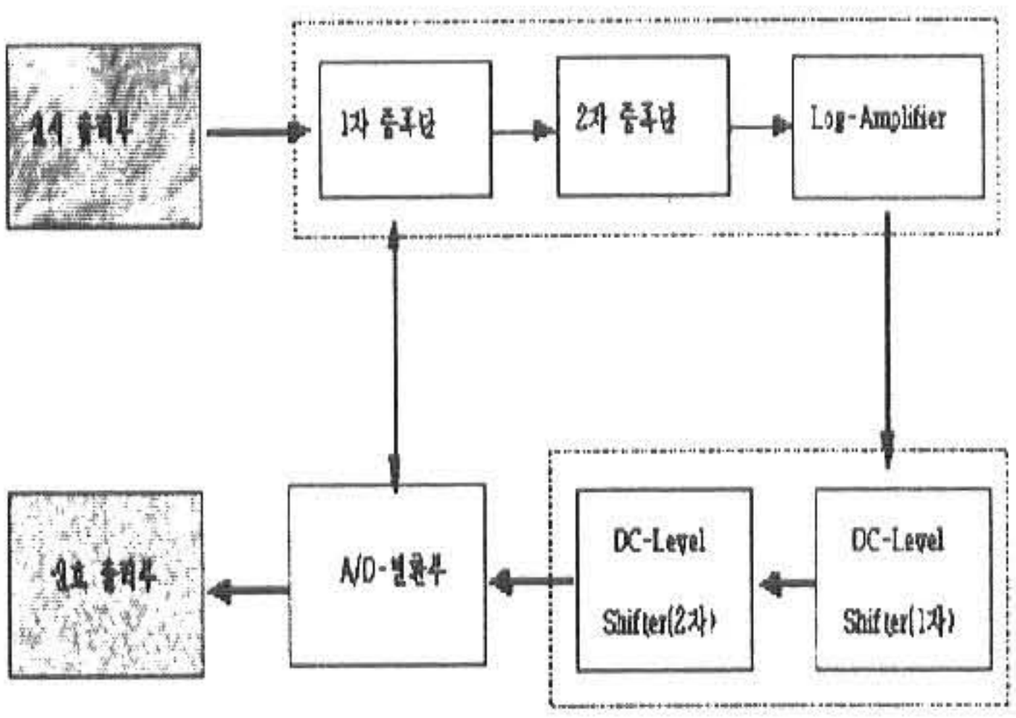

Fig. 6 Signal flow diagram of a head unit

적외선 센서의 전류-온도 특성은 온도증가에 따라서 전류신호의 출력이 비 선형적으로 증가함으로 작은 온도변화에 대해서 전류값이 급격히 증가하여 증폭단의 출력이 최대 온도에 도달되기 전에 최대 값으로 포화되는 경우가 발생한다. 따라서 최대 온도구간에 도달될 때까지 각각의 온도구간에 대해서 가능하면 선형적인 이득특성을 취하도록 하기 위해 1차 증폭단의 증폭이득 종류를 3개구간으로 나누었다. 이들 3개의 이득은 각각 10배의 차이를 가지게 설계했고 따라서 최소이득과 최대이득 사이는 약 40dB의 이득 차가 발생한다.

DC-Level 변환기는 2단계를 거쳐서 최종적

으로 원하는 전압을 얻게 되는데 1단계에서 AC신호 증폭과 DC신호 증폭(= level shift)을 거친 전압신호(0-6V)는 2단계에서 가변저항을 사용한 전압 분배기에 의해서 원하는 전압신호(0-4.096)를 얻는다. 변환된 전압신호는 Head부의 Microprocessor로 입력되기 위해서 A/D 변환기를 거친다. A/D변환된 후에 출력되는 12-bit 디지털 출력신호(0-4095)는 Microprocessor로 입력되어 이 값의 평균치를 계산하여 전단의 Gain-Selector의 신호선택을 위해서 출력됨과 동시에 Display Unit으로의 전송을 위해서 RS-485 통신 신호로 변환되어 출력된다.

Display Unit으로 장거리 전송되는 디지털 신호는 적외선 센서로부터 감지되는 온도 값뿐만 아니라 Head부 내부의 온도 값을 반도체 온도센서(DS-1820)로부터 감지하여 두 가지의 신호를 동시에 전송시킨다.

3.3 메인 컨터롤러 및 표시부

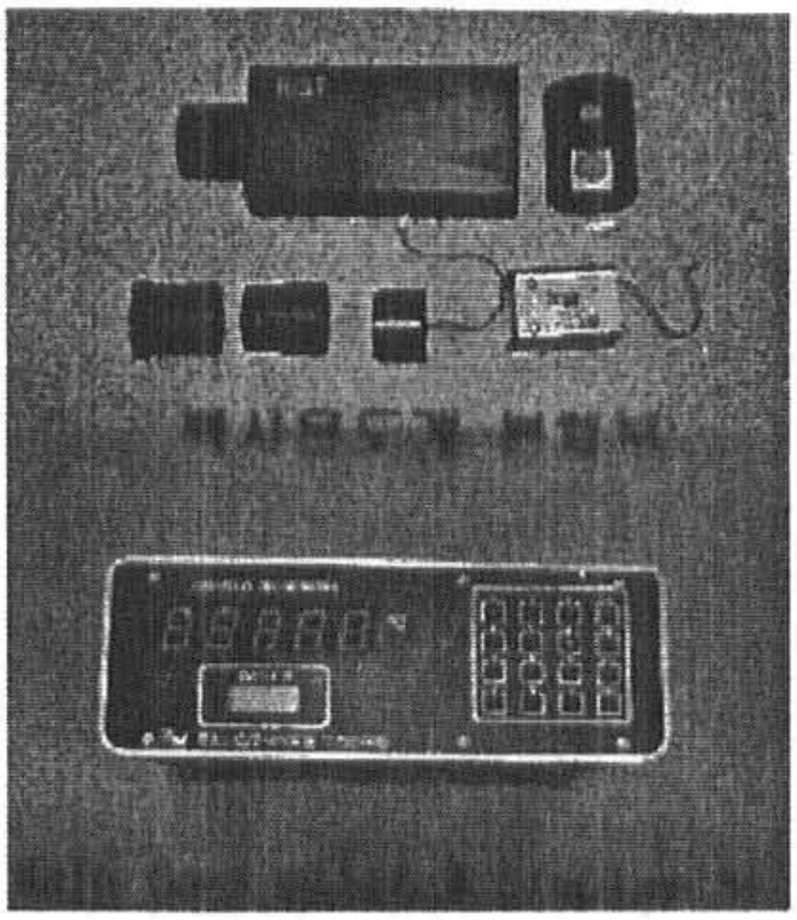

Fig. 7 Developed system of the radiation thermometer

복사온도계 헤더부로부터 장거리 전송되어온 데이터를 수신하여 2차 선형화를 실시한 후에 최종적인 온도값으로 계산하여 이를 출력장치로 표시되게 했다. 또한 동시에 온도 값을 아날로그 값으로 출력시켜서 상위 모니터링 센터와의 인터페이스를 가능하게 해주는 역할을 한다. 그리고 외부의 컴퓨터와 인터페이스를 실시해서 헤더부로부터 전송되어온 데이터를 직접 컴퓨터로 수신해 표시부로 관측되는 정보를 컴퓨터 상에서도 관측이 가능하게 설계했다. Fig.7은 최종적으로 개발된 복사온도계 본체부와 표시부에 대한 장치사진을 나타낸 것이다.

4. 실험 및 고찰

복사온도계 검. 교정을 위한 실험장치 사진을 Fig.8에 나타냈다.

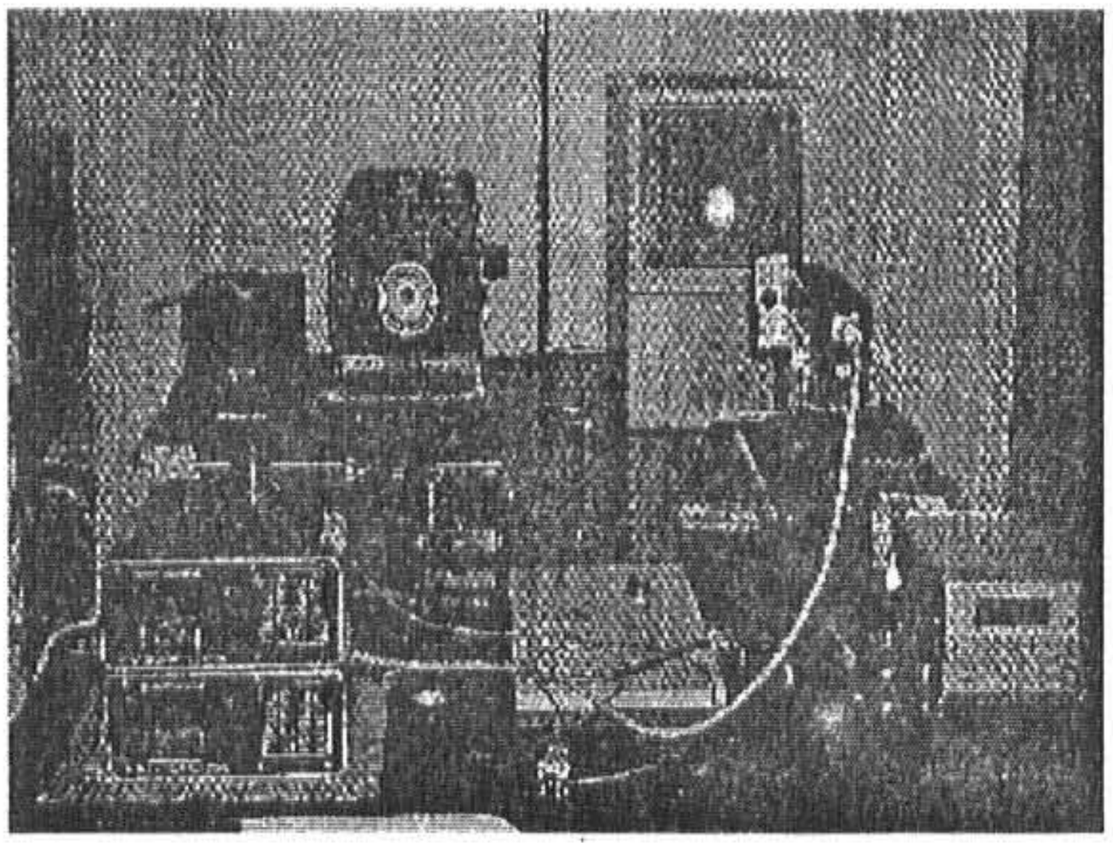

Fig. 8 Calibration system for the pyrometer

검.교정용 흑체로(Black body furnace)는 온도범위 300-1200℃인 IRCON사 BCH모델 1대와 온도범위 500-1500℃ 인 LAND사 R1500T 모델 1대를 각각 사용해 목표로 하는 온도범위에서 검. 교정 실험을 했다.

그리고 복사온도계 본체부는 높낮이 조절용 Lab. Jack과 좌.우 미세 조정용 마이크로미터로 구성된 지지 마운트에 고정하고 지지 마운트는 흑체로와의 측정거리를 자유롭게 조절할 수 있도록 눈금표시가 된 Optical rail상에 위치시켰다. 검. 교정 실험은 흑체로를 500-1500℃까지 50℃ 간격으로 증가시키면서 실험했고 각 단계마다 흑체로를 30분 정도 안정시킨 후 다음 온도로 변화시켰다.

그리고 실험결과를 이용해 교정함수를 도출하고 온도계 성능평가를 위해 교정 정밀도, 측온 오차, 재현성, 신호 분해능 등을 계산했다. 또한 복사온도계 본체 내부에 내장된 접촉식 온도센서를 이용해 온도변화에 대한 출력특성을 측정하여 그 결과를 이용해 내부온도 보상함수를 도출했다.

먼저 흑체로를 이용해 복사온도계의 교정함

수를 구한 후 교정함수가 얼마나 정확하게 실제 복사온도계 값에 Fitting되는지를 실제 값과 편차를 구해본 결과 ±0.08 % 범위 이내의 Fitting 오차가 발생함을 확인했다.

복사온도계 측정오차 실험은 흑체로 온도를 50℃ 간격으로 증가시킨 후 안정된 상태에서 구한 교정함수를 적용하여 실제로 각 단계에서 800회 이상 복사온도를 측정한 후 그 값을 평균해 흑체로 실제 온도값과 비교해 오차를 분석했다.

분석 결과 앞에서와 유사하게 ±0.08 % 범위 이내를 유지했다. 실험 결과에 대한 그래프를 Fig. 9에 나타냈다. 복사 온도계 재현성 실험은 흑체로 온도를 800℃에 안정시킨 후 복사온도계를 이용해 약 1시간 40분 동안 측정하여 그 결과를 Fig. 10과 같이 그래프로 나타냈다.

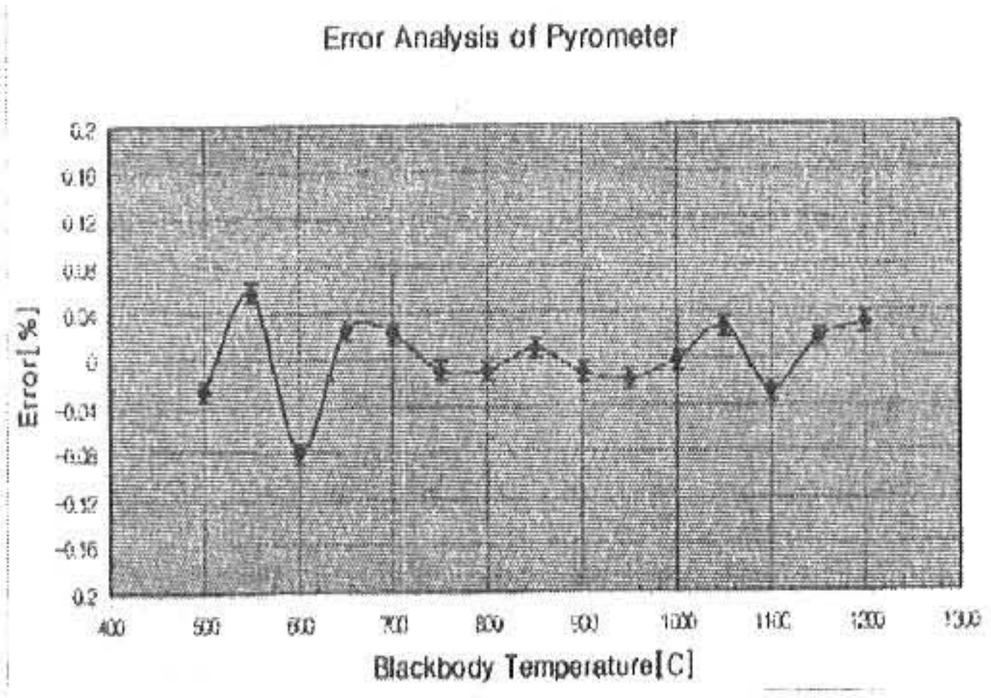

Fig. 9 Error analysis graphic of the pyrometer

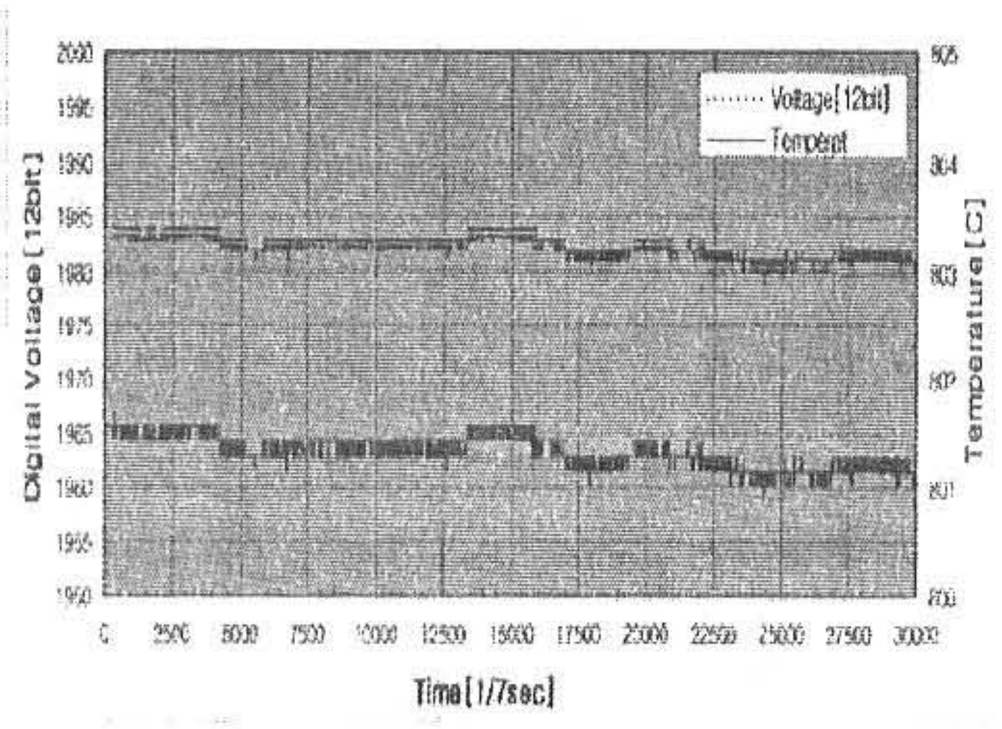

Fig. 10 Repeatability test of the pyrometer

실험 결과 약 0.5℃ 이내의 복사온도 편차를 나타냈고 이는 약 ±0.0625 % 의 편차에 해당한다. 신호 분해능은 전체 온도구간을 3개의 이득 보상 구간으로 나눴을 때 1구간에서 0.1℃, 2구간에서 0.166℃, 3구간에서 0.195℃ 를 가짐으로써 전체적으로 0.2℃ 이내의 분해능을 가짐을 확인했다.

4. 결 론

본 연구는 제철소와 같은 환경에서 현장 활용도를 증대시키기 위한 범용 복사온도계 개발을 목표로 했다. 이를 위해 먼저 실험용 복사온도계를 이용해 측온대역 복사에너지에 대한 광검출 특성을 평가하여 그 결과를 이용해 최종적으로 복사온도계 설계사양을 결정했다. 이를 토대로 개발된 복사온도계에 대해 정밀 검. 교정을 행한 후 성능평가를 실시했다. 평가 결과 실험실 기준으로 개발된 복사온도계는 측온 범위 500-1500℃, 측정 정밀도 ±0.1%, 온도 재현성 ±0.2% 이고 분해능이 0.2℃임을 확인했다.

개발된 복사온도계를 다시 현장 적용형으로 개조한 후 제철소 열연 공정 라인에 약 6개월 이상 설치하여 측정 정도 및 신뢰성 테스트를 했다. 테스트결과 만족할 만한 신뢰성과 정도가 확보되었음을 확인했다. 이를 토대로 향후 복사온도계의 국산화를 추진할 예정이며 또한 제철소와 같이 측정개소에 각종 먼지와 냉각용 수분 등이 함유된 경우에도 측정 정밀도를 향상시키기 위한 연구를 계속할 예정이다.

참고문헌

1) D. P. DeWitt and G. D. Nutter : Theory and Practice of Radiation Thermometry, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, (1988)
2) J. C. Richmond and D. P. DeWitt, :Applications of Radiation Thermometry, ASTM Special Technical Publication 895, Philadelphia, PA, (1985)
3) Temperature Measurement, Part 5. : Guide to selection and use of radiation pyrometers, British Standard 1040 (1989)

(2002년 2월 14일 접수, 2002년 8월 20일 채택)