

◆특집◆ 인체 물리량 측정 및 표준

체온 측정의 표준 및 신뢰성 향상

박철웅*, 박승남**

Development of Standard and Improvement of Reliability in Body Temperature Measurement

Chul-Woung Park* and Seung-Nam Park**

Key Words : Body temperature (체온), Ear thermometer (귀 체온계), Tympanic thermometer (고막 체온계) Radiation thermometer (복사 온도계), Blackbody (흑체)

1. 서론

최근 미국질병예방센터의 연구에 의하면 패혈증에 의한 사망률이 83% 증가하였다고 한다. 이 중에서 감염성 질병으로부터 58%가 증가하였으며, 호흡기를 통한 감염으로부터 20%가 증가 하였다.¹ 주의하면 피할 수 있는 병원감염으로 2 만명이나 사망하여, 매년 50 억불~100 억불의 추가비용이 발생하고 있다.² 위와 같은 질병은 발열이 감염의 첫 번째 징후이기 때문에 초기에 발열을 검출하여 잘 대처하면 환자의 조기 처치를 통한 좋은 예후를 기대할 수 있다. 미국의 경우 해마다 결장암에 의해 약 5 만 명의 목숨을 잃은 것과 같은 정도로, 6 천만번의 잘못된 체온측정에 의하여 목숨을 잃고 있다.³ 병원감염과 마찬가지로 잘못된 체온측정에 의한 사망률도 체온측정의 신뢰도를 높이면 크게 줄일 수 있을 것이다.

체온측정의 중요도에도 불구하고 시판되고 있는 체온계가 모두 정확한 것은 아니다. 국내의 경

우 제품의 형식승인을 받기만 하면 출시될 수 있기 때문에 판매되는 온도계 별로 따로 시험 검사하거나 교정을 해서 사용하고 있지 않고 있다. 최근 사용이 편리한 적외선 귀체온계가 일반화되면서 체온측정의 신뢰도 확보가 매우 중요성 문제로 부각되고 있다. 한국표준과학연구원에서는 국내 유통되는 5 개사 6 종의 귀체온계를 수거하여 측정의 정확도를 평가한 적이 있다. Fig. 1 은 이 체온계로 표준 흑체로 측정된 후 평균값에 대한 각 체온계의 편차를 보여준 것으로, 반 이상의 온도계가 허용한계를 벗어나는 심각한 상황을 보여주고 있다. 이런 문제점은 장기안정도가 좋지 못한 귀체온계 자체의 결함에서 기인한 점도 있지만, 출시 전 제작사의 품질제어 과정이나 출시 후 의료 현장에서 사용될 때 측정품질을 관리하기 위한 적외선 온도표준의 불확도가 높아서 발생할 수 있다.

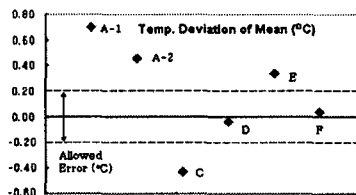


Fig. 1 Temperature deviation of commercially available ear thermometers from the mean

* 한국표준과학연구원 기반표준부 온도표도그룹

Tel. 042-868-5225, Fax. 042-868-5022

Email: cwpark@kriss.re.kr

복사온도계에 의한 고온 국가측정표준확립, 고막체온계와 열화상측정기와 같은 의료용 비접촉 온도측정기의 성능평가에도 관심을 갖고 있다.

** 한국표준과학연구원 기반표준부장

이 논문에서는 적외선 복사온도계를 이용한 체온측정과 체온 대표온도(내온)와의 관계에 대하여 먼저 알아본다. 또한 체온측정용 적외선 복사온도계의 신뢰도유지에 관한 규격과 규격에서 추천하는 교정용 가변 온도 흑체 불확도와 사용시 문제점을 분석해본다. 또한 최근 표준과학연구원 에서 흑체의 온도를 고정점 측정결과로 실현한 복사 온도 눈금과 비교하여 체온 측정의 신뢰도를 확인하는 과정을 기술하였다.

2. 체온

체온측정의 최종목표는 인체 내부의 온도(내온) 또는 체온 대표온도를 정확하게 측정하는 것이다. 심장의 중심 온도가 가장 유용한 생명징후이기 때문에 심장 중심의 온도를 비침습 방법으로 안전하고, 간편하게, 순간적으로 측정할 수 있는 방법이 필요하다. 정상인의 체온을 숫자 하나로 표현할 수는 없다. 일반적으로 알려져 있는 것과는 다르게 정상인의 8 %만이 정상체온으로 알려진 37 °C 를 유지하고 있다. 정상체온이 37 °C 라는 오래된 이 개념은 40 세 이하의 성인의 구강온도를 기준할 때 이른 아침 37.2 °C 에서부터 37.7 °C 의 범위에서 유지되는 것으로 바뀌야 한다.⁴

체온을 비침습 방법에 의해 간접적으로 알기 위해서 인체 특성 부위의 온도를 측정한다. 지금까지 가장 많은 사용되고 있는 구강 측정은 빠른 호흡, 기침, 한숨, 음식물의 먹고 마시기, 구강 호흡, 코골이, 대화 등과 같은 환자의 활동에 의해서 원하는 온도보다 낮은 측정결과를 초래하게 된다. 구강측정의 더 큰 문제는 발열 자체가 구강측정 결과를 더욱 낮추는 결과를 야기하는 것이다. 발열은 기본 심박수를 증가시키고, 산소 소모가 증가함에 따라 호흡수를 증가시킴으로써 구강의 온도를 더욱 낮추게 되어 발열 검출의 감도를 떨어뜨리는 결과를 초래한다. 직장 측정은 깊은 조직의 온도를 얻을 수 있다고 일반적으로 받아들여지고 있지만, 장시간 측정해 보면 발열에 대한 응답 속도가 낮아서 만족스러운 결과를 주지 못하는 많은 연구사례들이 발표되었다.

측정 부위 중에서 가장 최근에 측정이 시도된 부위가 귀이다. 귀는 쉽게 접근이 가능할 뿐만 아니라, 체액과는 상관없으며, 환자의 활동에 거의 영향을 받지 않기 때문에 측정이 시도되었다. 측

정방법은 고막측정법, 귀 측정법 및 동맥열평형법 세 가지가 있으며, 모두 적외선 온도계를 사용한다. 용어에 있어서 귀 체온계와 고막체온계를 혼용해서 사용하고 있지만, 고막 측정이란 두개골 깊은 곳에 있는 고막을 직접 측정함으로써, 구강, 직장, 겨드랑, 귀를 측정함으로 발생하는 임의성을 제거할 수 있는 체온측정을 뜻한다. 고막을 측정하기 위하여 열전대를 사용을 시도한 적은 있지만, 고막 파열의 위험성 때문에 거의 사용되지 않고 있다. 적외선 복사온도계를 이용하면 고막의 온도를 거의 비침습적으로 측정할 수 있다. 미국 내 한 대학병원의 중환자실에서 이루어진 연구는 적외선온도계로 측정된 고막온도와 폐동맥의 온도가 잘 일치하는 것을 보고하였다.⁵

3. 적외선 복사온도계의 체온 측정 신뢰도

3.1 가변 온도 흑체를 이용한 귀체온계 교정

체온측정용 적외선 복사온도계는 체온 근처의 온도영역에서 가변 온도 흑체로 교정하여 사용한다. 교정에 사용되는 흑체는 측정온도 영역에서 플랑크 복사 법칙에 따라 복사선이 방출된다고 가정하여 사용되므로 측정과장영역에서 복사율은 1 이다. 따라서 가변온도 흑체에 설치된 접촉식 온도계와 적외선복사온도계를 직접 비교 교정한다. 병원에서 만들어 사용할 수 있는 귀체온계 교정용 흑체 모양에 관한 특허도 보고되고 있다.⁶

가변 온도 흑체를 이용하여 귀체온계의 신뢰도를 유지하는 과정에 대한 국제 규격을 알아보면 다음과 같다. 영국과 EU 표준에서는 병원용 온도계 중 귀 체온계의 사용에 관한 일반적이 요구사항과 귀체온계 교정용 저온 흑체의 모양 및 사용 흑체의 특성을 기술하고 있다.⁷ 여기서 추천한 흑체는 가변 온도영역이 15 °C - 45 °C 이고 온도 안정도가 0.02 °C 보다 작다. 흑체의 모양은 30 °로 기울어진 판을 설치한 실린더형 튜브로 제작 하였다.

다른 국제표준으로 ASTM 에서는 환자의 체온 측정용 귀 체온계의 사용법 및 주요 기능에 관하여 기술하고 있다.⁸ 특히 귀 체온계를 이용하여 귀의 내부나 고막의 온도를 측정했을 때 실제 체온의 대표온도와 달라질 수 있는 가능성을 분석하여 불확도를 분석하는 방법을 기술하고 있다. 귀 체온계를 이용하여 고막의 온도를 직접 측정하지

않은 경우에 체온 대표온도를 알아내는 분석과정과 절차도 기술하고 있다. 이 규격에서는 36 °의 갈대기 형태의 흑체를 귀 체온계의 교정용으로 추천하였다.

이와 같이 다른 모양의 흑체 때문에 생길 수 있는 불확도를 포함하여 국가간의 체온측정의 정확도를 확인하기 위해 3 개국 사이의 국제 비교연구가 보고 되었다.⁹ 3 개국이 37 °C 근처의 영역에서 체온측정용 복사온도계의 측정정확도를 비교해본 결과 ±0.01 °C 이내에서 일치함을 보였다. 따라서 위의 국제규격에 따라서 체온측정용 복사온도계를 교정하여 사용하면 ±0.1 °C 이내의 불확도를 실현할 수 있다.

표준과학연구원에서 체온측정용 복사온도계를 교정하는데 사용하는 저온안정화 흑체가 Fig 2 에 있다. 이 흑체는 냉각수를 사용하여 온도가 조정되고 온도 측정에는 백금저항온도계(Platinum Resistance Thermometer; PRT)를 사용한다.

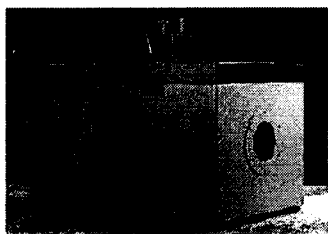


Fig. 2 Reference blackbody for calibration of radiation thermometer in KRISS

Table 1 Uncertainty budgets for reference blackbody for radiation thermometer calibration

Source of uncertainty	Temperature (°C)		
	20	30	40
	Standard uncertainty (°C)		
PRT calibration	0.01	0.01	0.01
PRT stability	0.005	0.005	0.005
PRT measurement	0.005	0.005	0.005
Cavity wall heat loss	0.001	0.001	0.001
Emissivity(0.9995)	0.02	0.02	0.03
Standard Uncertainty (k=1)	0.02	0.02	0.03

이 흑체를 이용하여 체온측정용 복사온도계를 교정하는 경우의 불확도 성분을 Table 2 에 정리하였다. 체온근처의 온도영역에서 ±0.1 °C 이내의 확장 불확도(k=2)로 교정이 가능함을 알 수 있다.

3.2 체온근처의 복사온도 눈금실현 및 흑체온도와 비교

앞절의 방법에서는 흑체의 복사율이 1 이라는 가정에서 교정을 수행한다. 따라서 사용하고 있는 흑체가 플랑크복사 법칙에 따라 복사선이 나오는 지(복사율이 1 인지)를 확인해야 하는데, 복사온도 눈금을 독립적인 방법으로 실현하여 흑체의 접촉식 온도계의 눈금과 비교하면 가능하다.

복사온도눈금을 실현하는 가장 근본적인 방법은 국제온도눈금(ITS-90; International Temperature Scale-1990) 의 정의에 따라 한 점 이상의 고정점에서 신호를 측정하고 복사온도계의 분광감응도를 측정하여 온도눈금을 확장하는 것이다. 그러나, 귀체온계와 같이 측정 유효파장이 8- 14 μm 근처의 적외선 영역에 위치한 복사온도계는 분광감응도를 측정하기가 불가능하다. 따라서 ITS-90 에서 응고 온도가 정의된 여러 개 순수 금속 고정점의 세기를 측정하고 그 결과를 적절한 내삽공식을 사용하여 온도눈금을 실현하는 방법을 사용한다.

표준과학연구원에서는 체온 영역에서 기준복사온도계 (Reference Radiation Thermometer; RRT)를 사용하여 독립적인 복사 온도눈금을 실현하기 위하여 얼음점 (0.01 °C), 갈륨점 (29.7646 °C), 인듐(156.60 °C), 주석(231.93 °C)점을 이용하였다. 모든 고정점 셀의 개구의 직경은 10 mm 이고, 금속의 순도는 5 N 이상이다.

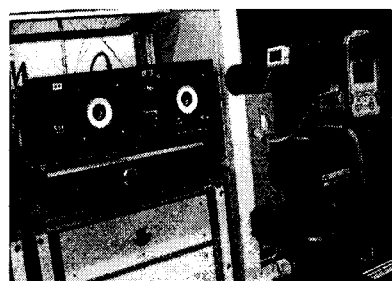


Fig. 3 Fixed point realization of reference radiation thermometer using the blackbodies

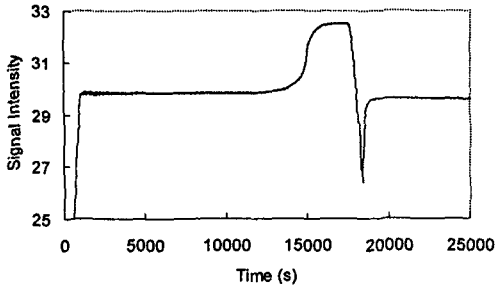


Fig. 4 Melting and freezing curves of the gallium fixed point blackbody

고정점 셀은 온도 가변전기로 (Isotech, Pegasus R) 에서 실현하였다. RRT 로 고정점을 실현하는 모습이 Fig. 3 에 있고, 실현한 갈륨의 용융- 응고곡선의 측정결과가 Fig. 4 이다. Fig. 4 의 측정결과를 보면 용융점의 신호가 응고점 보다 높게 나오는 것을 알 수 있다. 이 차이는 금속의 불순물에 의한 효과로 설명할 수 없으며, 복사온도계의 복사원 크기 효과(Size of Source Effect; SSE 같은 온도의 복사체원 경우라도 복사원의 크기가 큰 경우에 더 높은 온도로 측정되는 효과)를 가정하기 않고는 설명할 수 없다. 측정 시 복사온도계의 최소표적 크기는 6 mm 로 흑체 개구의 직경 10 mm 보다 작지만, SSE 에 의하여 흑체 개구 밖에서 방출되는 복사 에너지의 차이를 무시할 수 없다. 즉, 용융시킬 때 흑체 개구의 바깥은 용융점보다 높은 분포를 유지하게 되고, 반대로 응고시킬 때는 흑체 개구의 바깥부분은 응고점 보다 낮게 된다. 이 두 경우에 온도분포의 차이가 대칭적이라고 가정하며, 용융점과 응고점 신호를 평균한 값은 흑체 개구가 전기로의 개구까지 충분히 넓은 흑체에 해당하는 신호라고 볼 수 있다. 따라서, 이 연구에서는 고정점의 신호를 응고점과 용융점 신호를 평균하여 취하였다.

위와 같은 방법으로 4 개의 고정점을 실현하고 이 고정점 신호를 이용하여 온도눈금을 만들기 위해서는 신호세기와 온도와의 관계를 기술하는 내삽공식이 필요하다. 체온처럼 온도가 낮은 영역이고, 사용하는 복사온도계의 유효파장이 긴 경우에는 플랑크의 복사법칙으로부터 출발하는 (1)식과 같은 내삽공식을 사용하는 것이 내삽 영역에서 더 잘 맞는 결과를 기대할 수 있다.¹⁰

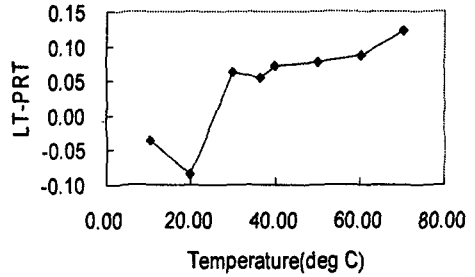


Fig. 5 Comparison of realized radiation temperature scales with PRT installed in the blackbody used for the ear thermometer calibration

$$S = \frac{a_1}{\exp\left(\frac{c_2}{a_2 T + a_3}\right) - 1} \quad (1)$$

위 식은 지금까지 고온의 온도영역에서 주로 사용하던 Sakuma-Hattori 공식의 분모에 -1 이 추가된 것인데, 유효파장이 비교적 긴 경우, -1 을 무시하면 매우 큰 내삽 오차가 발생한다.

Fig. 5 은 이와 같이 고정점 실현을 실현하고 내삽 공식의 계수를 결정하여 얻은 RRT 의 온도눈금과 표준과학연구원에서 귀체온계의 교정에 사용하는 흑체의 PRT 로 측정된 온도를 비교한 것이다. 체온 근처의 영역에서 ±0.1 °C 이내에서 일치하는 결과를 보이고 있다.

이와 같은 측정결과로 보면 지금까지 체온측정용 교정이 매우 신뢰도 있게 수행되고 있었음을 확인할 수 있다. 고정점 측정결과로부터 얻은 저온복사온도눈금이 불확도 분석 결과가 아래 Table 2 에 있다.

Table 2 Uncertainty budgets for low temperature radiation thermometer

Source of uncertainty	Temperature (°C)			
	0.01	10	29.76	40
	Standard uncertainty (°C)			
Fixed point	0.01	0.01	0.01	0.01
Repeatability	0.01	0.01	0.01	0.01
Interpolation		0.07		0.07
Size of source	0.03	0.03	0.03	0.04
Standard Uncertainty (k=1)	0.03	0.08	0.03	0.08

불확도 분석에는 고정점의 측정 불확도, 재현성, 내삽 불확도, 크기효과를 고려하였다. 실현된 온도 눈금의 불확도 분석결과를 보면 고정점에서는 내삽오차가 없기 때문에 확장 불확도가 0.1 °C 이지 만, 고정점 사이의 영역에서는 내삽 불확도 성분이 포함되어 0.1 °C 이보다 조금 커지게 된다. 위의 불확도 성분뿐 아니라 RRT의 장기안정도 성분 또한 크게 영향을 미친다. 실험에 사용한 RRT의 장기안정도는 체온근처의 영역에서 0.05 °C 이상으로 측정되었다.

고정점 측정 결과로부터 복사온도눈금을 실현하여 귀체온계 교정에 사용하는 흑체의 온도를 확인하는 과정이 체온측정의 신뢰도확립에 필요하다. 따라서 산업체나 의료계에서 귀체온계 교정에 사용하는 온도 가변 흑체를 주기적으로 표준과학연구원의 복사온도눈금과 비교 교정하여 신뢰도를 확인하면 체온측정의 불확도를 크게 감소시킬 수 있다.

4. 결론

체온의 변화를 정확히 측정하면 감염이나 병세의 진전을 정확히 판단할 수 있기 때문에 체온의 대표온도(내온)를 정확히 측정할 수 있는 기술 개발은 매우 중요하다. 지금까지 연구된 결과에 의하면 내온은 심장부근의 온도이며 이 온도를 비침습적으로 측정하려면 고막의 온도를 적외선 복사온도계로 측정하는 것이 가장 비슷하다. 한국표준과학연구원에서는 가변 온도 흑체를 이용하여 귀체온계를 교정하는 체계를 확립하였다. 또한 흑체의 온도를 고정점을 이용하여 실현한 복사온도 눈금과 비교하여 교정 신뢰도를 확인하였다. 따라서 산업체나 의료계에서 흑체를 이용하여 체온측정용 복사온도계를 교정하는 경우에 흑체를 주기적으로 표준과학연구원에서 복사온도 눈금과 비교 교정 받는 것이 필요하다.

후 기

본 연구는 2007년 표준과학연구원 기본사업인 “신수요대응 측정표준개발” 과제의 일환으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다. 또한 이 논문의 실험을 도와주신 김봉학님께 감사 드립니다.

참고문헌

1. Pinner, R. W., Teutsch, S. M., Simonsen, L., Klug, L. A., Graber, J. M., Clarke, M. J. and Berkelman R. L., “Trends in infectious diseases mortality in the US” JAMA, Vol. 275, No. 3, pp. 189-193, 1996.
2. Freeman, J., “Hospitals that infect,” Harvard Magazine: Jul-Aug, pp. 18-20, 1996.
3. Tandberg, D. and Sklar, D., “Effects of tachypnea on the estimation of body temperature by an oral thermometer” NE. J. Med., Vol. 308, No. 16, pp. 945-946, 1983.
4. Mackowiak, P. A., Wasserman, S. S. and Levine, M. M., “A critical appraisal of 98.6 degrees F, the upper limit of the normal body temperature, and other legacies of Carl Reinhold August Wunderlich,” JAMA, Vol. 268, No. 12, pp.1578-1580, 1992.
5. Pompei, M., “Arterial Heat Balance Thermometry at an Exposed Skin Site: Accuracy, Comfort, and Convenience for Patient and Clinician” Exergen Corporation Rev., Vol. 5, No. 9, pp. 2 -41, 1999.
6. Exergen Corporation, “Floating blackbody calibration verification device,” Newton, MA, US Pat 5,183,337.
7. European Standard EN 12470-5 “Clinical thermometers - Part 5: Performance of infra-red ear thermometers (with maximum device),” 2003.
8. ASTM designation E-1965-98, ASTM committee, E20.08, 1998.
9. Ishii, J., Fukuzaki, T., McEvoy, H. C., Simpson, R., Machin, G., Hartmann, J., Gutschwager, B. and Hollandt, J., “A comparison of the blackbody cavities for infrared ear thermometer of NMII, NPL, AND PTB” TEMPMEKO 2004 proceeding, pp.1093-1098, 2004.
10. Park, S. N., “Improvement of temperature scale of the medium temperature range from 500 K to 1250 K,” Establishment and improvement of temperature/optics measurement standards, Korea Research Institute of Standards and Science, pp.133-137, 2006.