

〈 논문 〉

## 온도 민감 형광을 이용한 마이크로 스케일 표면온도 측정

정운섭\* · 김성욱\*\* · 김호영\* · 유정열†  
(2005년 8월 24일 접수, 2006년 1월 18일 심사완료)

### Surface Temperature Measurement in Microscale with Temperature Sensitive Fluorescence

Woonseop Jung, Sungwook Kim, Ho-Young Kim and Jung Yul Yoo

**Key Words :** Temperature Sensitive Fluorescence(온도 민감 형광), Micro Heater(마이크로 히터), Local Heating(국소가열), Temperature Field(온도장)

#### Abstract

A technique for measuring surface temperature field in microscale is newly proposed, which uses temperature-sensitive fluorescent (TSF) dye coated on the surface and is easily implemented with a fluorescence microscope and a CCD camera. The TSF dye is chosen among mixtures of various chemical compositions including rhodamine B as the fluorescent dye to be most sensitive to temperature change. In order to examine the effectiveness of this temperature measurement technique, numerical analysis and experiment on transient conduction heat transfer for two different substrate materials, i. e., silicon and glass, are performed. In the experiment, to accurately measure the temperature with high resolution temperature calibration curves were obtained with very fine spatial units. The experimental results agree qualitatively well with the numerical data in the silicon and glass substrate cases so that the present temperature measurement method proves to be quite reliable. In addition, it is noteworthy that the glass substrate is more appropriate to be used as thermally-insulating locally-heating heater in micro thermal devices. This fact is identified in the temperature measuring experiment on the locally-heating heaters made on the wafer of silicon and glass substrates. Accordingly, this technique is capable of accurate and non-intrusive high-resolution measurement of temperature field in microscale.

#### 기호설명

$C$  : 형광염료의 농도( $kg\ m^{-3}$ )

$I$  : 방출강도( $Wm^{-2}$ )

$I_0$  : 초기 광원의 강도( $Wm^{-2}$ )

$I_{ref}$  : 기준 온도에서의 방출강도

$T$  : 온도( $^{\circ}C$ )

$t$  : 시간( $s$ )

$x$  : 히터로부터의 거리( $\mu m$ )

$\Phi$  : 양자효율

$\varepsilon$  : 몰 흡수 계수( $m^2kg^{-1}$ )

$\rho$  : 밀도( $kg\ m^{-3}$ )

$C_p$  : 비열( $J/kgK$ )

$K$  : 열전도율( $W/mK$ )

$\Delta t$  : 시간간격( $s$ )

$h$  : 대류 열전달 계수( $Wm^{-2}K^{-1}$ )

$T_{\infty}$  : 대기 온도( $K$ )

\* 회원, 서울대학교 기계항공공학부

\*\* 삼성종합기술원

† 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail: jyyoo@snu.ac.kr

TEL: (02) 880-7112 FAX: (02) 888-2968

#### 1. 서 론

마이크로 반응기(micro reactor), 마이크로 냉각기

(micro cooler), 종합효소 연쇄반응기(polymerase chain reaction chip),  $\mu$ TAS(micro Total Analysis System) 등 다양한 마이크로 디바이스에서 정확한 온도측정은 디바이스의 개발과 성능을 위하여 매우 중요한 인자가 된다. 마이크로 스케일에서 온도를 측정하는 방법은 여러 가지가 있다. 크게는 접촉식과 비접촉식 측정방법으로 분류할 수 있다. 접촉식 측정방법으로는 열전대(thermocouple), 저항온도계 등이 있다. 열전대는 호환성, 사용범위 등을 고려할 때 널리 사용되는 온도계이며, 저항온도계는 열모세관 펌프(thermocapillary pump),<sup>(1)</sup> 종합효소 연쇄반응기<sup>(2)</sup> 등에서 적용된 바가 있으나 유동교란을 발생시킬 수 있어서 마이크로 스케일에서 정밀한 온도를 측정하기가 어렵다. 비접촉식 측정방법으로는 열색성 액정(thermochromic liquid crystal), 레이저 유도 형광법(laser-induced fluorescence) 등이 있다. 열색성 액정을 사용하여 종합효소 연쇄반응기,<sup>(3,4)</sup> 전자부품의 표면<sup>(5)</sup> 등에서 온도를 측정한 경우가 있으나, 대부분 측정 온도 범위가 20°C에 지나지 않으므로 보다 넓은 범위의 온도 측정이 곤란하다. 레이저유도 형광법 또는 온도 민감 형광(temperature sensitive fluorescence)은 형광염료의 방출강도(emission intensity)가 온도에 따라 변화하는 원리를 이용한다. 형광염료의 방출강도는 온도에 대한 함수이며, 다음과 같이 표현된다.

$$I(T) = I_0 \varepsilon C \Phi(T) \quad (1)$$

온도가 증가함에 따라 양자효율  $\Phi$ (quantum efficiency)이 감소하기 때문에 방출강도가 감소한다. 따라서 방출강도를 측정함으로써 온도장을 측정할 수 있다. 레이저유도 형광법을 이용한 온도측정 연구는 매우 다양하게 이루어지고 있으며<sup>(6-9)</sup> 최근에 마이크로 스케일에서의 온도장 측정에도 성공적으로 적용되고 있다.<sup>(10,11)</sup> 일반적으로 형광염료로는 로다민 B(rhodamine B)를 많이 사용하는데, 이는 온도에 따른 방출강도의 변화율이 -1.5 ~ -3 %/K로 비교적 크기 때문이다. 그러나 레이저유도 형광법은 형광염료의 광표백(photo-bleaching),<sup>(9,12)</sup> 섀도우그래프 효과(shadowgraph effect),<sup>(9,13)</sup> 초기광원의 강도 변화 등 여러 가지 고려해야 할 기술적 문제들이 존재한다. 이러한 문제들을 해결하고자 온도에 민감한 로다민 B와 민감하지 않은 로다민 110(rhodamine 110)을 사용하는 2색 레이저유도 형광법(two-color laser-induced fluorescence)도 사용되고 있다.<sup>(8,10,14,15,16)</sup> 이러한 방법은 로다민 B와 로다민 110의 방출강도의 비로 온도를 측정한다. 또한, 2색 레이저유도 형광법은 광원의 강도변화와 염료의 불균일한 농도분포

등의 문제를 해결할 수 있으나, 두 형광염료의 방출파장(emission wavelength)이 겹치는 문제점을 가지고 있다.

본 연구에서는 온도에 민감한 형광염료를 표면에 코팅하여 마이크로 스케일에서 넓은 범위의 표면온도장을 측정할 수 있는 새로운 기법을 제안하고자 한다. 또한, 표면온도 측정방법의 성능평가를 위해서, 온도에 따른 빠른 시간 응답과 마이크로 스케일상에서 국소적으로 가열이 가능한 마이크로 히터를 제작해야 한다. 선행 연구로 미소전기기계시스템(MEMS) 공정에서 많이 사용하는 실리콘 웨이퍼와 열전달을 고려한 유리 웨이퍼를 기판으로 하는 히터를 수치해석 하였고, 같은 조건으로 실제 히터를 제작하여 실험을 수행하였다.

## 2. 수치해석 및 실험방법

### 2.1 수치해석

표면온도 측정방법의 성능평가를 위해서, 미소전기기계시스템공정에서 많이 사용하는 실리콘과 열전달을 고려한 유리를 기판으로 사용하는 경우에 대해 각각 천이 열전도 해석을 수행하였다. 수치해석에서 원점( $x = 0$ )은 히터의 중심을 나타내며, 히터의 폭은 제작할 히터와 같이 10 $\mu$ m로 하였다. 히터의 열 공급은  $t = 0$ 에서부터 연속모드와 펄스모드로 5 x 10<sup>10</sup> Wm<sup>-3</sup>을 주었다. 또한, 히터와 기판의 표면에서의 경계조건으로 초기온도와 대기온도( $T_\infty$ )를 25 °C로 하고, 자연대류만 고려하고 복사는 무시하였고, 대류 열전달 계수( $h$ )는 7.5 Wm<sup>2</sup>K<sup>-1</sup>로 주었다. 히터부분에서의 지배방정식은 다음과 같이 표현되며,

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{h}{\Delta x} (T - T_\infty) + \dot{q} \quad (2)$$

기판으로의 열전달은 다음의 지배방정식으로 표현된다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{h}{\Delta x} (T - T_\infty) \quad (3)$$

**Table 1** Material properties and reference values used in numerical analysis

material	$\rho$ (kg m <sup>-3</sup> )	$C_p$ (Jl kgK)	$k$ (W/mK)	$\Delta t$ ( $\mu$ s)
silicon	2330	712	148	0.1
glass	2225	835	1.4	10

2.2 마이크로 히터의 제작

표면온도 측정과 수치해석의 결과를 비교하기 위해서 온도장 측정 대상인 마이크로 히터를 유리 웨이퍼(glass wafer)와 실리콘 웨이퍼(silicon wafer)를 사용하여 제작하였다. Fig. 1(a)는 유리를 기판으로 사용하는 히터 제작공정을 나타낸다. 우선 400  $\mu\text{m}$  두께의 유리 웨이퍼에 열원인 백금-티타늄을 4000  $\text{\AA}$ 의 두께로 스퍼터링(sputtering) 한 후,  $\text{SiO}_2$  를 1 $\mu\text{m}$  두께로 플라즈마화학기상증착(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) 하고, 표면을 평탄화하기 위해서 화학기계적연마(Cheical Mechanical Polishing) 공정을 수행하였다. 한편, 기판으로의 열전도를 최소화하여 국소가열이 가능하도록 모래분사(sand blasting) 공정을 이용하여 히터 아래 면의 두께를 최소화하였다. 끝으로 RIE(Reactive Ion Etching) 공정으로 접촉패드(contact pads)를 표면에 노출시켰다. Fig. 1(b)는 500  $\mu\text{m}$  실리콘 웨이퍼를 사용하여 히터를 제작하는 공정을 나타낸다. 5000 $\text{\AA}$  두께로 TEOS 를 증착하고, 5000 $\text{\AA}$  두께로 폴리실리콘을 저압화학기상증착(Low Pressure Chemical Vapor Deposition) 공정으로 증착한 후, 패시베이션 막(passivation layer)을 증착하였다. 끝으로, 접촉패드를 표면에 노출시키고 나서 알루미늄을 증착하였다.

2.3 형광염료의 조성 및 검정

히터 표면의 온도장을 측정하기 앞서 온도변화에 대해 가장 큰 방출강도 차이를 보이는 혼합비를 결정하였다. 표면에 형광염료 (rhodamine B)를

코팅 하기 위하여 SU8 포토레지스트(SU8 photoresist), 희석제, 아세톤을 혼합하였다. 아세톤을 사용한 이유는 SU8 포토레지스트와 로다민 B가 모두 아세톤에 용해되기 때문이며, 희석제는 코팅 두께를 조절하기 위해서 사용하였고, 이때의 코팅 두께는 약 1 $\mu\text{m}$  이다. 다양한 혼합비의 온도 민감 형광염료 혼합물에 대하여 실험한 결과, SU8 포토레지스트, 희석제, 아세톤, 로다민 B의 양이 각각 5 ml, 2.5 ml, 10 ml 및 0.01 g 일 때 온도변화에 따라 가장 큰 방출강도 차이를 나타냄을 알 수 있었다.

마이크로 히터의 온도검정과 온도장을 측정하기 위하여 Fig. 2 와 같은 실험장치를 구성하였다. 온도검정을 위하여 히터 표면에 온도 민감 형광염료 혼합물을 코팅한 후, 단열이 가능한 챔버에 검정용 히터와 측정 대상인 마이크로 히터를 설치하였다. 광원은 수은등과 아르곤-이온 레이저(Ar-Ion laser)를 사용하였으며, 영상은 Cooled CCD 카메라(PCO sensicam QE)를 사용하여 획득하였다. 단열 챔버 내부의 온도는 열전대로 측정하였다. 검정용 히터의 온도를 조절하면서 마이크로 히터 위에 형광염료의 방출강도 영상을 컴퓨터에 저장하였다. Fig. 3(a)는 특정 온도에서 측정한 방출강도 200 장을 평균한 영상이고, Fig. 3(b)는 5 X 5 픽셀단위로 평균한 영상이며, Fig. 3(c)는 기준 온도에서 얻은 방출강도로 Fig. 3(b)의 특정 온도에서의 방출강도를 나눈 영상이다. Fig. 3(a)에서 5 X 5 픽셀의 확대 영상을 보면, 균일한 온도에서 얻은 영상이 픽셀마다 방출강도의 차이가 있음을 알 수 있다. 이러한 상태에서 온도검정을 할 경우 많은 온도장의 노이즈를 발생시킨다. 따라서 Fig. 3(b)에서는 5 X 5 픽셀 단위로 영상을 평균하였고, 이러한 방법으로

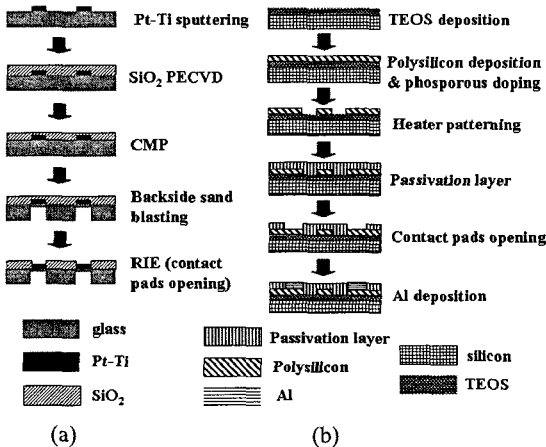


Fig. 1 Fabrication process of micro heater array: (a) SiO<sub>2</sub> substrate, (b) Silicon substrate

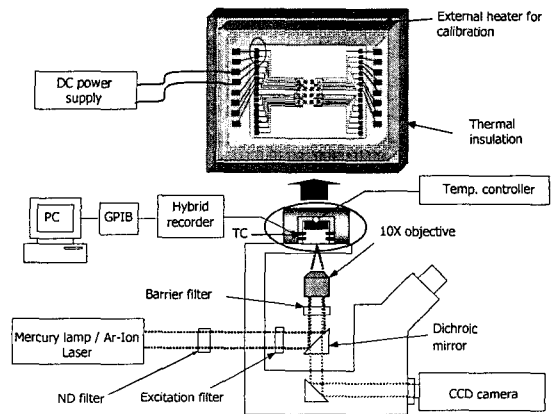


Fig. 2 Experimental setup

픽셀간의 방출강도의 차이를 제거하여 근접한 픽셀간의 온도 변동도 줄일 수 있었다. 또한 Fig. 3(b)에서 볼 수 있듯이, 전 영역에서 일정한 온도를 갖더라도 측정된 방출 강도는 영역에 따라 다른 것을 알 수 있다. 이는 광원이 마이크로 히터에 불균일하게 반사되고, 로다민 B 가 마이크로 스케일에서 균일하게 코팅되지 않기 때문이다. 따라서 모든 픽셀에 대해 각각 온도검정 다항식을 구하는 픽셀단위의 온도검정을 수행함으로써 측정된 영역에서 방출강도의 불균일함을 보완할 수 있다. Fig. 4 는 마이크로 히터 표면상의 임의의 4 점에서 온도검정곡선을 보여주는 것으로서, 곡선의 형태가

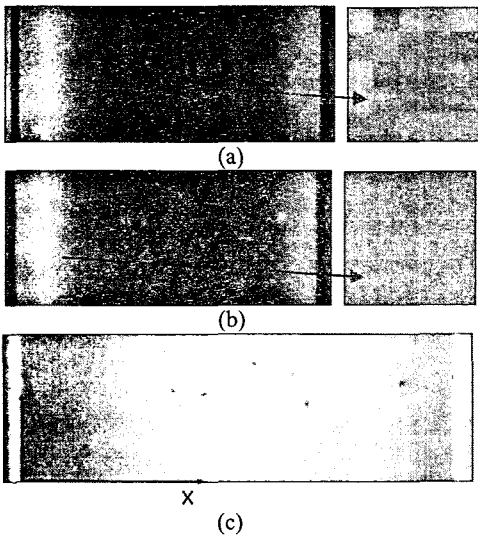


Fig. 3 Sample images of temperature calibration: (a) raw image, (b) averaged intensity, (c) intensity ratio

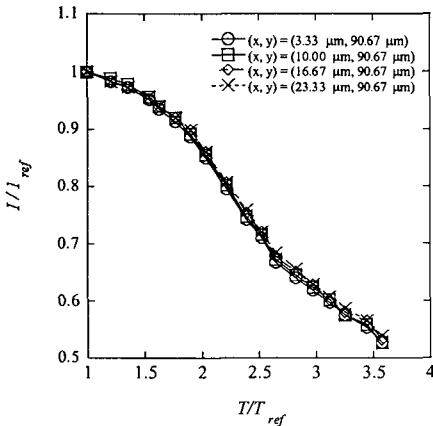


Fig. 4 Calibration curves depicting the relationship between fluorescent intensity and temperature at four locations

3 차 곡선의 특성을 나타내므로 3 차 다항식 검정 곡선을 사용하였다.

온도장을 측정할 때는 Fig. 2 에서 단열챔버와 검정용 히터를 제거 한 후, 온도 민감 형광염료 혼합물을 코팅한 마이크로 히터를 인쇄회로기판 (Printed Circuit Board)에 장착하였다. 히터의 접촉패드와 인쇄회로기판을 와이어본딩(wirebonding)을 하고 다시 인쇄회로기판과 직류전원장치(DC Power Supply)를 연결하여, 마이크로 히터가 발열가동 되도록 하였다. 이러한 마이크로 히터를 국소적으로 작동시키면서 영상을 얻은 후에 5 x 5 픽셀단위로 평균한 후, 기준 온도에서 얻은 방출강도로 나누어서 영상을 얻는다. 앞서 구한 온도검정에서 형광염료의 방출강도와 온도간의 관계로부터 마이크로 히터의 방출강도를 온도로 환산할 수 있다.

### 3. 결과 및 해석

#### 3.1 수치해석 결과

Fig. 5 와 Fig. 6 은 연속모드로 열을 공급한 경우, 시간에 따른 온도 변화를 나타낸다. Fig. 5 는 기판으로 실리콘을 사용한 경우, 히터와 기판 표면 전체에서 온도가 상승함을 알 수 있다. Fig. 6 에서는 유리를 기판으로 사용한 경우, 히터와 그 부근에서만 국소적으로 온도가 증가함을 알 수 있었다. 즉, 실리콘을 기판으로 사용한 경우는 국소가열이 잘 되지 않는다는 것을 알 수 있다. Fig. 7 과 Fig. 8 은 펄스모드로 열을 공급한 경우, 시간에 따른 응답을 나타낸다. Fig. 7 에서와 같이 실리콘을 기판으로 사용한 경우, 히터를 끄더라도 온도가 떨어지지 않고 오히려 위치에 따라 온도가 계속 상승하는 경우를 볼 수 있다. Fig. 8 에서와 같이 유리를

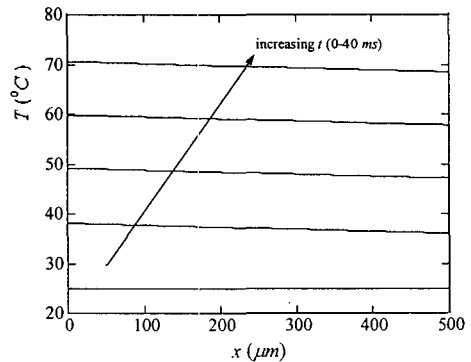


Fig. 5 Temperature distribution in continuous heating mode (for silicon substrate)

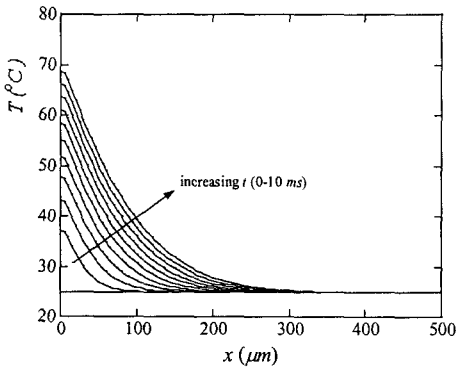


Fig. 6 Temperature distribution in continuous heating mode (for SiO<sub>2</sub> substrate)

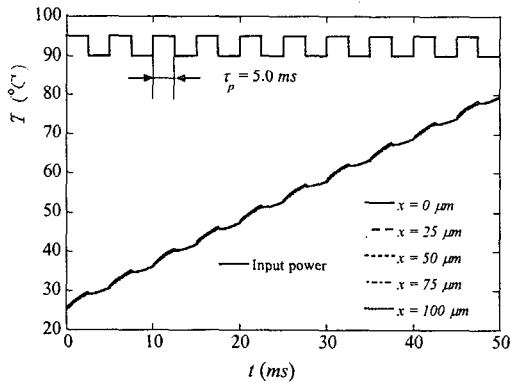


Fig. 7 Time response in pulsed heating mode (for silicon substrate)

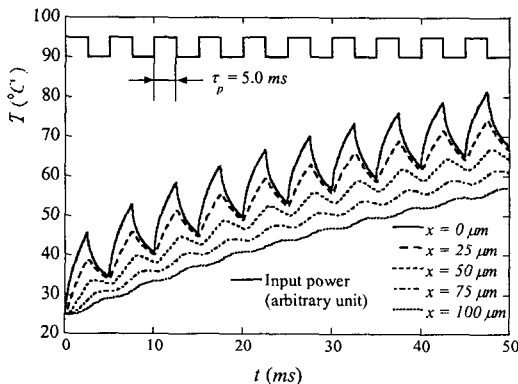


Fig. 8 Time response in pulsed heating mode (for SiO<sub>2</sub> substrate)

기판으로 사용한 경우는 히터로부터의 열 공급에 따라 온도변화가 잘 따라가는 것을 볼 수 있다. 이는 유리와 실리콘의 열전도도가 매우 큰 차이를 가지고 있기 때문이다. 실리콘의 경우 유리에 비해 열전도도가 약 100 배 정도 크기 때문에 열원으로 인해서 매우 강한 열전달이 일어나 국소적으로 온도를 상승시키기가 어렵다. 따라서, 표면온도 측정방법의 성능평가를 위해서 온도에 따른 빠른 시간응답과 마이크로 스케일상에서 국소적으로 가열이 가능한 히터를 제작할 필요가 있다.

본 수치해석의 결과 이러한 조건을 수행하기 위해서는 유리를 기판으로 마이크로 히터를 제작해야 하며, 이는 실험의 결과로 다시 확인 할 수 있다.

### 3.2 실험결과

Fig. 9 는 실리콘 웨이퍼를 기판으로 사용하여 제작한 마이크로 히터를 켜는 때의 방출강도비를 나타낸다. 이 그림에서 왼쪽의 하나의 히터만 켜는 때

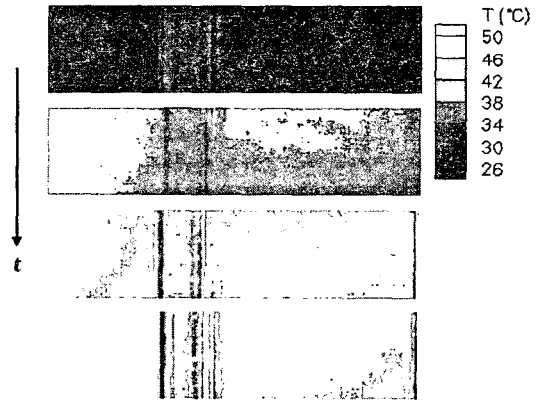


Fig. 9 Temperature field on the silicon heater

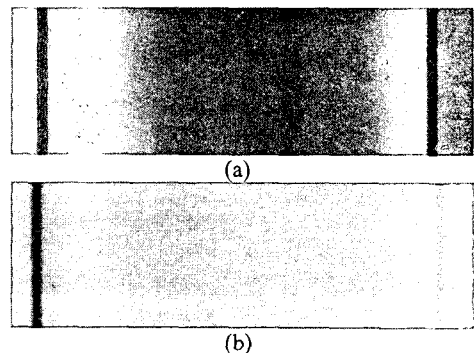


Fig. 10 Fluorescence intensity on I-type heater array: (a) emission intensity, (b) intensity ratio ( $I/I_{ref}$ )

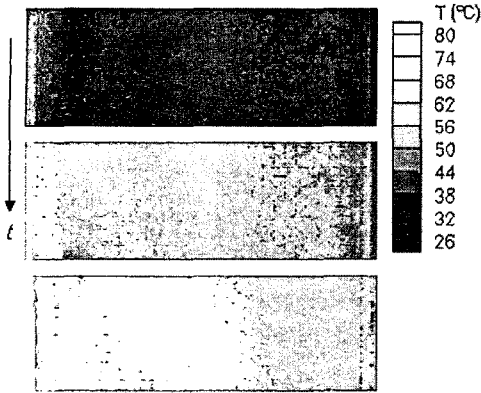


Fig. 11 Temperature field on I-type heater array

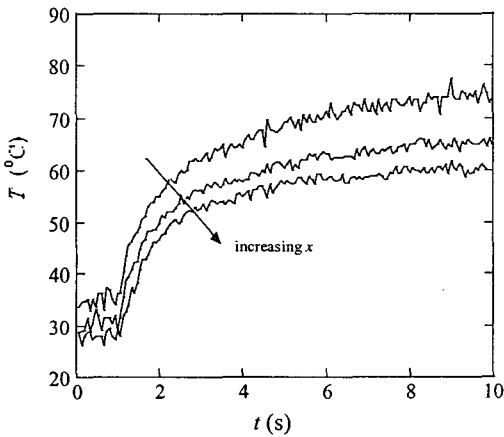


Fig. 12 Time response of microheater just after the heater is turned on

표면 전체로 온도가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 국소적 가열이 어렵다는 것을 나타낸다. Fig. 10(a)와 10(b)는 유리를 기판으로 사용하여 제작한 마이크로 히터에서 왼쪽의 하나의 히터만을 켜올 때의 형광 방출강도와 방출강도비를 나타낸다. Fig. 10(a)에서, 왼쪽 히터 위의 강도는 오른쪽 히터 위의 강도와 크게 다르지 않음을 알 수 있으나, Fig. 10(b)와 같이 방출강도비에서는 왼쪽 히터 위의 강도비가 오른쪽 히터위의 강도비보다 더 낮음을 볼 수 있다. 즉, 국소가열 성능은 방출강도비에서 더욱 확연히 확인 된다. 또한, 픽셀 단위의 온도검정을 수행한 후 측정된 온도장은 Fig. 11에서 볼 수 있듯이, 히터 위의 온도장을 잘 나타내며, 이 그림은 2.67 초 간격으로 측정된 온도장이다. 히터 바로 위에서는 순간적으로 80 C까지 온도가 상승하지만 히터에서부터 멀어질수록 온도가

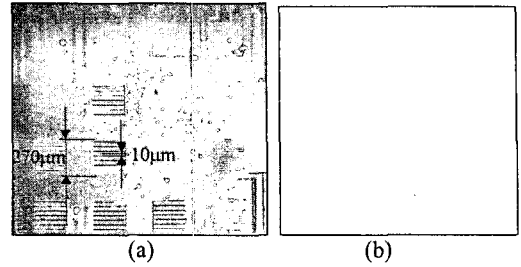


Fig. 13 Emission intensity on 4 X 4 serpentine-type heater array: (a) emission intensity, (b) intensity ratio ( $I/I_{ref}$ )

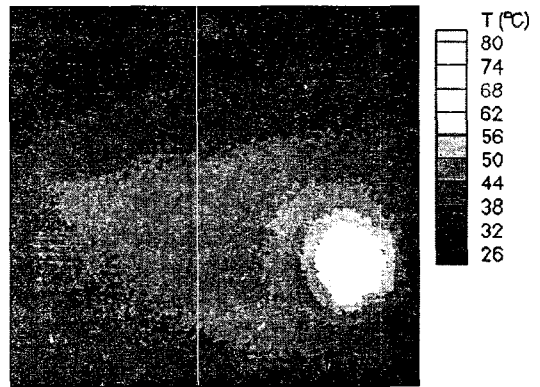


Fig. 14 Temperature field on 4 X 4 serpentine-type heater array ( $t = 0.92$  s)

낮음을 볼 수 있고 온도구배도 작다. 따라서, 수치해석의 결과와 마찬가지로, 표면온도장 측정방법의 성능평가를 위해서는 온도에 따른 빠른 시간 응답과 마이크로 스케일상에서 국소적으로 가열이 가능한 유리 기판 히터를 사용해야 한다. 유리를 기판으로 사용한 경우, 시간에 대한 히터의 온도 상승 응답을 Fig. 12에 나타내었다. 여기서, 히터를 켜올 때 온도가 급격히 올라가는 것을 알 수 있다. 히터의 국소가열 성능을 Fig. 13에서 제시한 바와 같이 4 x 4 사행형태 (serpentine shape)의 히터에 대해서도 확인하였다. 여기서 히터의 선 폭은 10  $\mu\text{m}$  이고 하나의 히터 크기는 270 x 270  $\mu\text{m}$  이다. 이 히터의 경우, 오른쪽 하단의 히터를 켜올 때, Fig. 13(a)에서와 같이 바로 그 히터 위에서 국소적으로 방출강도가 떨어지는 것을 볼 수 있으며 이러한 국소가열 성능은 Fig. 13(b)에서와 같이 방출강도비에서 더욱 확연히 확인된다. Fig. 14는 이 히터를 켜고 0.92 초 후의 온도장을 보여준다. 이로부터 열을 공급한 히터 위에서 국소적으로 온도가 상승하는 특성을 다시 확인할 수 있다. 또한, 아르곤-이온 레이저를 광원으로 사용한 경우에는

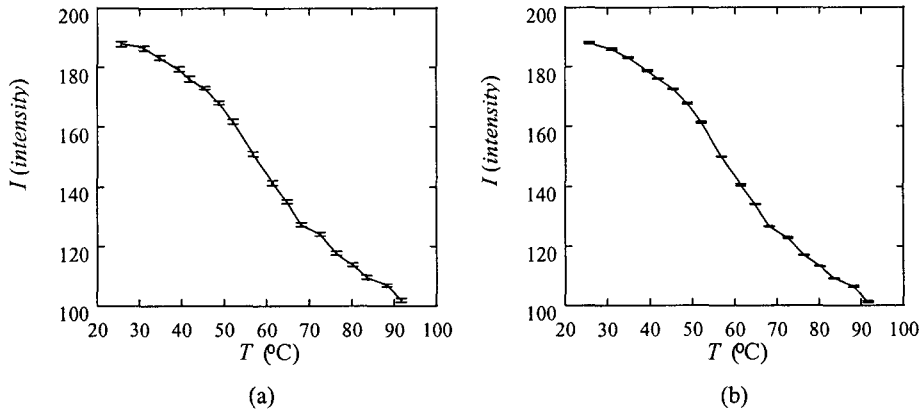


Fig. 15 Deviation of intensity vs. temperature: (a) Interrogation window dimension of 1 X 1 pixel ( $0.67 \mu\text{m} \times 0.67 \mu\text{m}$ ), (b) Interrogation window dimension of 5 X 5 pixels ( $3.35 \mu\text{m} \times 3.35 \mu\text{m}$ )

마이크로 디바이스의 표면온도장을 측정하는데 심각한 문제들이 나타난다는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 히터를 켜올 때 히터표면과 대물렌즈 사이의 공기가 함께 가열됨으로 인해 공기의 굴절률이 변화한다. 이로 인해, 광학계로부터 발생하는 간섭 무늬의 위치가 변화하기 때문에 픽셀단위의 온도 검정을 하더라도 정밀한 온도장의 측정이 어렵게 된다. 이러한 문제는 표면이 아닌 유체 체적 내의 온도를 측정하거나 2 색 레이저유도 형광법을 사용하면 극복이 될 것으로 기대된다.

### 3.3 오차해석

레이저유도 형광법에서 방출강도는 온도에 따라서 변화하는 데, 정밀한 온도를 측정하기 위해서 초기 광원의 강도변화, 형광염료의 분해, 형광염료의 불균일한 분포 등 고려해야 할 문제들이 존재한다. 본 연구에서는 형광염료의 균일한 분포를 만들기 위해서 스핀코터 (spin coater)를 사용하였고, 초기 광원의 강도 변화를 줄이고 형광염료의 분해를 막기 위해서, 여러 개의 중화필터 (neutral density filter)를 사용하여 초기 광원의 광량을 0.18 % 만 통과 시켰으나, 균일한 온도에서 1 X 1 픽셀( $0.67 \mu\text{m} \times 0.67 \mu\text{m}$ ) 간에 방출강도의 차이가 존재하는 것을 볼 수 있었다. 이는  $0.67 \mu\text{m} \times 0.67 \mu\text{m}$  범위 내에서 형광염료가 균일하게 코팅이 되지 않았으며, 히터 표면에서 광원의 불균일한 반사로 인해서 1 X 1 픽셀간의 방출강도의 차이가 생기는 것 같다. 따라서, 1 X 1 픽셀과 5 X 5 픽셀간격으로 온도검정을 행한 경우에 대해서 오

차 해석을 수행하였다. Fig. 15(a)와 Fig. 15(b)에서는 공간분해능과 방출강도의 변화효과를 알 수 있게 온도검정자료를 가지고 95 %의 신뢰구간으로 통계적 접근을 하였다. Fig. 15(a)에서 도시된 바와 같이, 온도검정곡선을 1 X 1 픽셀 간격으로 얻을 경우 공간분해능이  $0.67 \mu\text{m} \times 0.67 \mu\text{m}$  이고, 특정 픽셀에서 온도 표준편차는  $\pm 1.76 \text{ }^\circ\text{C}$  이며, 방출강도의 표준편차는  $\pm 2.55$  이다. 이에 비하여, Fig. 15(b)에서 도시된 바와 같이, 5 X 5 픽셀 간격으로 평균한 이미지의 온도검정곡선의 경우 공간분해능이  $3.35 \mu\text{m} \times 3.35 \mu\text{m}$  이고, 특정 픽셀에서 온도의 표준편차는  $\pm 0.0938 \text{ }^\circ\text{C}$  이며, 방출강도의 표준편차는  $\pm 0.14$  이다. 이러한 결과로부터, 비록 5 X 5 픽셀 단위로 평균하여 온도장을 측정하는 경우가, 1 X 1 픽셀 단위로 온도장을 측정하는 경우에 비하여 공간분해능은 떨어지지만, 정밀하게 온도장을 측정 할 수 있음을 알 수 있다.

## 4. 결론

마이크로 기기의 표면온도장을 측정하기 위해서 SU8 포토레지스트, 희석제, 로다민 B, 아세톤의 여러 혼합물 중에 온도에 따라서 가장 큰 방출강도가 나오는 조성비를 얻었다. 이러한 온도 민감 형광염료를 표면에 코팅하여 마이크로 스케일에서 표면온도장을 측정할 수 있다. 표면온도장 측정의 성능평가를 위해서, 마이크로 히터 기관으로 실리콘, 유리 웨이퍼를 사용하여 표면온도장을 수치해석과 위에서 언급된 온도 민감 형광염료를 이용하여 실험으

로 구하였다. 실험과 수치해석의 결과 유리웨이퍼를 사용한 경우, 실리콘 웨이퍼를 사용한 마이크로 히터보다 표면온도 측정이 용이하였다. 즉, 유리 웨이퍼를 기판으로 하는 히터가 국소가열과 온도에 따른 시간응답이 빠른 것을 알 수 있었다. 본 연구의 측정방법은 각 픽셀 간에 온도편차를 보정하고 보다 정밀한 온도장을 얻고자, 5 X 5 픽셀 간격으로 평균한 방출강도의 비로 각 픽셀당 온도검정곡선을 얻었다. 이러한 온도 측정방법은 마이크로 스케일에서 유동의 교란을 일으키지 않으면서, 공간분해능이  $3.35 \mu\text{m} \times 3.35 \mu\text{m}$  이고, 특정 픽셀에서 온도의 표준편차는  $\pm 0.0938 \text{ }^\circ\text{C}$  로 매우 정밀한 표면온도장을 얻을 수 있음을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 마이크로열시스템 연구센터의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Sammarco, T. S. and Burns, M. A., 1999, "Thermocapillary Pumping of Discrete Drops in Microfabricated Analysis Devices," *AIChE J.*, Vol. 45, No. 2, pp. 350~366.
- (2) Yoon, D. S., Lee, Y. S., Lee, Y., Cho, H. J., Sung, S. W., Oh, K. W., Cha, J. and Lim, G., 2002, "Precise Temperature Control and Rapid Thermal Cycling in a Micromachined DNA Polymerase Chain Reaction Chip," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 12, pp. 813~823.
- (3) Chaudhari, A. M., Woudenberg, T. M., Albin, M. and Goodson, K. E., 1998, "Transient Liquid Crystal Thermometry of Microfabricated PCR Vessel Arrays," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 7, No. 4, pp. 345~355.
- (4) Liu, J., Enzelberger, M. and Quake, S., 2002, "A Nanoliter Rotary Device for Polymerase Chain Reaction," *Electrophoresis*, Vol. 23, pp. 1531~1536.
- (5) Azar, K., Benson, J. R. and Manno, V. P., 1991, "Liquid Crystal Imaging for Temperature Measurement of Electronic Devices," *Proc. 7<sup>th</sup> Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*, Phoenix, AZ, USA, pp. 23~33.
- (6) Sakakibara, J., Hishida, K. and Maeda, M., 1993, "Measurements of Thermally Stratified Pipe Flow Using Image-Processing Techniques," *Experiments in Fluids*, Vol. 16, pp. 82~96.
- (7) Sakakibara, J., Hishida, K. and Maeda, M., 1997, "Vortex Structure and Heat Transfer in the Stagnation Region of an Impinging Plane Jet (Simultaneous Measurements of Velocity and Temperature Fields by Digital Particle Image Velocimetry and Laser-Induced Fluorescence)," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 40, No. 13, pp. 3163~3176.
- (8) Sakakibara, J. and Adrian, R. J., 1999, "Whole Field Measurement of Temperature in Water Using Two-Color Laser Induced Fluorescence," *Experiments in Fluids*, Vol. 26, pp. 7~15.
- (9) Coolen, M. C. J., Kieft, R. N., Rindt, C. C. M. and van Steenhoven, A. A., 1999, "Application of 2-D LIF Temperature Measurements in Water using a Nd:YAG Laser," *Experiments in Fluids*, Vol. 27, pp. 420~426.
- (10) Kim, H. J. and Kihm, K. D., 2001, "Application of a Two-Color Laser Induced Fluorescence (LIF) Technique for Temperature Mapping," *Proc. 2001 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE2001/HTD-24411*, New York, NY, USA.
- (11) Ross, D., Gaitan, M. and Locascio, L. E., 2001, "Temperature Measurement in Microfluidic Systems Using a Temperature-Dependent Fluorescent Dye," *Analytical Chemistry*, Vol. 73, pp. 4117~4123.
- (12) Crimaldi, J. P., 1997, "The Effect of Photobleaching and Velocity Fluctuations on Single-Point LIF Measurements," *Experiments in Fluids*, Vol. 23, pp. 325~330.
- (13) Clemens, N. T., 2002, "Flow Imaging," *Encyclopedia of Imaging Science and Technology* (ed. by Hornak, J. P.), John Wiley & Sons, New York, NY, USA, pp. 390~419.
- (14) Hishida, K. and Sakakibara, J., 2000, "Combined Planar Laser-Induced Fluorescence-Particle Image Velocimetry Technique for Velocity and Temperature Fields," *Experiments in Fluids*, Vol. 29, Issue 7, pp. S129~S140.
- (15) Funatani, S., Fujisawa, N. and Ikeda, H., 2004, "Simultaneous Measurement of Temperature and Velocity Using Two-Colour LIF Combined with PIV with a Colour CCD Camera and its Application to the Turbulent Buoyant Plume," *Measurement Science and Technology*, Vol. 15, pp. 983~990.
- (16) Coppeta, J. and Rogers, C., 1998, "Dual Emission Laser Induced Fluorescence for Direct Planar Scalar Behavior Measurements," *Experiments in Fluids*, Vol. 25, pp. 1~15.