

온도센서를 사용하지 않는 MEMS 마이크로히터 온도제어시스템

論文

55C-11-7

A Sensorless and Versatile Temperature-Control System for MEMS Microheaters

裴炳勳[†] · 廉楨勳* · Bruce R. Flachsbart** · Mark A. Shannon**
 (Byunghoon Bae · Junghoon Yeom · Bruce R. Flachsbart · Mark A. Shannon)

Abstract – In this paper, we present a temperature-controlled system for MEMS electrical resistance heaters without a temperature sensor. To rapidly control the heater temperature, the microheater system developed consists of a power supply, power amplifier, digital Proportional-Integral-Differential (PID) controller, and a quarter bridge circuit with the microheater and three resistors are nominally balanced. The microheaters are calibrated inside a convection oven to obtain the temperature coefficient with a linear or quadratic fit. A voltage amplifier applies the supply voltage proportional to the control signal from the PID controller. Small changes in heater resistance generate a finite voltage across the quarter bridge circuit, which is fed back to the PID controller to compare with the set-point and to generate the control signal. Two MEMS microheaters are used for evaluating the developed control system - a NiCr serpentine microheater for a preconcentrator and a Nickel microheater for Polymerase Chain Reaction (PCR) chip.

Key Words : Temperature Control System, Microheater, Preconcentrator, PCR chip.

1. 서론

본 논문에서는 여러 가지 MEMS 마이크로히터의 온도제어에 있어서 Resistance Temperature Detectors (RTD)나 thermocouple 등 별도의 온도센서를 사용하지 않는 다용도 온도제어 시스템을 소개한다. MEMS 마이크로히터의 온도제어시 별도의 온도센서들은 히터와의 거리와 자체 thermal mass로 인한 응답지연의 문제를 야기하므로 여기서는 온도에 따른 마이크로히터의 저항값의 변화를 가지고 온도제어 입력으로 활용하도록 한다.

마이크로히터를 이용한 온도제어에 대한 연구는 다음과 같이 행하여져 왔다. 신경세포 증식조절에 마이크로히터와 RTD가 사용되었으며 [1] 온도증가율이 15°C/s 인 실리콘 마이크로 히터와 RTD 가 preconcentrator에 사용되었다 [2]. 단일 칩 CMOS 마이크로히터가 온칩 온도센서, 제어기와 통합개발되었다 [3]. 미소 PCR칩을 위한 온도증가율 80°C/s 의 마이크로히터와 온도센서가 함께 개발되었다 [4]. 이러한 대부분의 마이크로히터는 별도로 제작된 온도센서를 가지고 있다. 그러나, 별도의 온도센서 없이 히터의 온도를 페루프 제어하는 연구는 그리 많이 행하여 지지 않아 왔다. 이 논문은 별도의 온도센서 없이 바라는 설정온도를 1초 이내 (혹은 최대한 빨리)에 도달할 수 있는 다용도 마이크로 히터

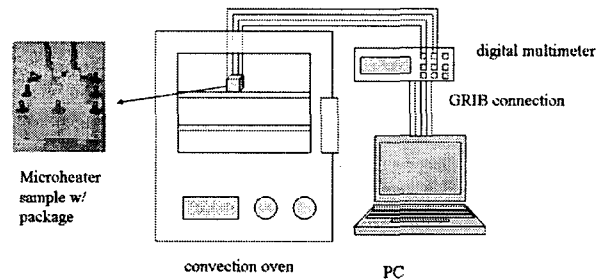


Fig. 1 Calibration setup to get the characteristic of the microheater.

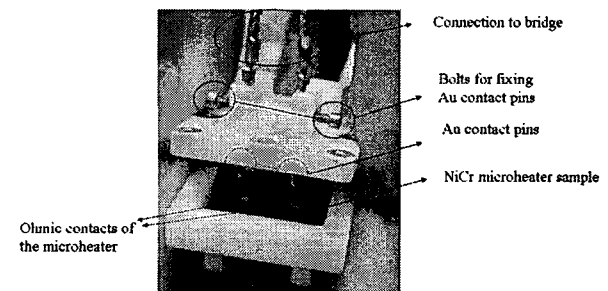


Fig. 2 Teflon package including the microheater.

온도제어시스템에 초점을 맞추고져 한다. 히터를 측정기를 이용하여 calibration하여 구한 히터의 온도상수만 이용하여 온도제어를 수행한다.

2. 히터 캘리브레이션

온도센서가 필요 없는 마이크로히터의 온도조절을 위해서

[†] 교신저자, 正會員 : Dept. of Mechanical Sci & Eng., Univ. of Illinois.

E-mail : bhbae@uiuc.edu

* 非會員 : Dept. of Mechanical Sci. & Eng., Univ. of Illinois.

** 非會員 : Dept. of Mechanical Sci. & Eng., Univ. of Illinois.

接受日字 : 2006年 9月 1日

最終完了 : 2006年 10月 11日

제작된 히터의 열 변화에 따른 저항 값의 특성변화를 파악해야한다. 그림 1은 히터를 캘리브레이션 하기 위한 실험장치 셋업의 개념도를 보여주고 있다. 마이크로히터 샘플의 온도를 조절하기 위해 convection 오븐 안에 히터 (예제에서는 NiCr 마이크로히터) 를 넣고 외부의 multimeter과 thermal protective wire로 연결하여 온도에 따른 저항변화 값을 관찰한다. 온도상승 시 샘플과 wire의 접촉문제를 고려하여 납땜하지 않고 그림 2와 같이 테프론 (Teflon) 재질의 패키지를 제작하여 히터와 Au 접촉 핀이 항상 일정한 힘으로 접촉하도록 하였다. Multimeter에서 읽혀진 저항값은 Gridded Binary (GRIB) 연결을 통해 PC 하드디스크에 저장 되도록 하였다.

그림 3은 NiCr 마이크로히터를 사용하여 캘리브레이션을 수행한 결과이다. 그림 3(a)는 히터를 오븐에 넣고 온도를 상온 26도부터 50, 100, 150, 200도로 올리면서 저항값의 변화를 보여주고 있으며, 그림 3(b)는 각각의 온도에서의 평균 저항값을 가지고 열저항 계수를 구한 후 이것으로 계산된 저항값과 실제 저항값과의 비교 데이터이다. 최대 오차값은 0.2%미만이었으며 실제 저항값의 데이터를 다음 식 (1)의 Calendar-Van Dusen equation에 fitting하여 열저항 계수 $\alpha=1.99e-4$, $\beta=8.0e-8$ 을 얻었다. 여기서 R , R_0 , ΔT 는 각각 저항값, 공칭 저항값, 오븐온도와 상온(여기서는 26도)와의 온도차를 가르킨다.

$$R = R_0 + R_0\alpha \Delta T + R_0\beta(\Delta T)^2 \quad (1)$$

따라서 별도의 온도센서 없이 실시간으로 히터의 저항값을 알 수 있다면 해당되는 온도를 알 수 있게 된다.

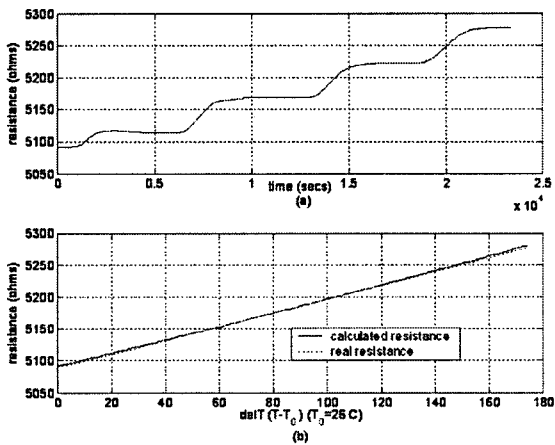


Fig. 3 Calibration data of a NiCr microheater (a) resistance profile as the temperature ramps up from the room temperature 26°C(T_0) to 50, 100, 150, and 200°C (b) Comparison of the calculated resistance (solid) and real resistance (dots) with respect to the temperature.

3. 실험 결과 및 고찰

그림 4는 전원공급기 (power supply), 전력증폭기 (power amplifier), 데이터 수집보드와 디지털 PID제어기 (data acquisition board/ digital PID control box), 1/4 브리지

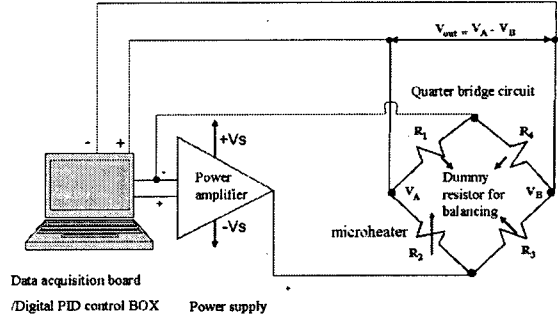


Fig. 4 A schematic of the temperature control system that consists of a power supply, power amplifier, digital Proportional-Integral-Differential (PID) controller, and a quarter bridge circuit with the microheater and three resistors are nominally balanced.

(quarter bridge circuit)로 구성된 온도제어시스템의 개념도를 보여주고 있다. 브리지 회로는 마이크로히터에 3개의 저항 (dummy resistors)을 추가로 사용하여 초기화시 널링 (nulling)을 한다. 전력증폭기는 브리지 출력과 히터의 온도 상수를 이용하여 측정된 실시간 온도값과 원하는 설정온도 값과의 차이에 비례한 전압을 히터에 공급해 준다. 그림 5는 실제 실험장치 셋업을 보여주고 있다.

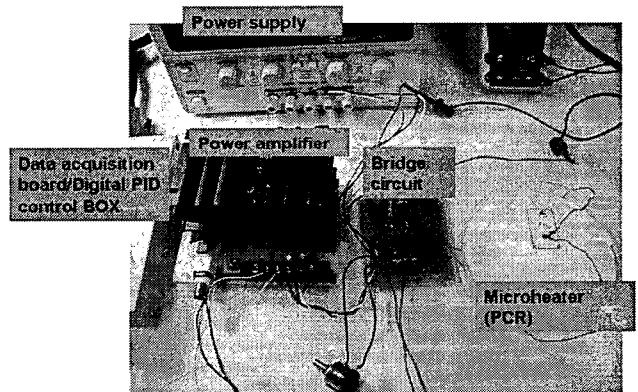


Fig. 5 A photograph of the real experiment setup.

제안하는 온도제어시스템을 검증하기 위해 두 가지 종류의 마이크로히터가 사용된다. 첫 번째는 단일 온도 추종을 위해 preconcentrator에 사용되는 마이크로히터로 그림 6에 나타나 있듯이 NiCr를 $18 \times 16 \times 0.05 \text{mm}^3$ 크기 칩 위에 성장된 산화 막 위에 적층하여 마이크로히터를 제작한다. 그림 7는 PID 제어를 사용하여 히터를 온도제어한 결과로써 오버슈트 및 정상상태 오차를 없애기 위해 PID 게인 설정 값을 튜닝하는 것이 필요하나 히터의 온도를 0.5초 이내에 200도까지 증가시키는 온도 파형을 보여주고 있으며 이것은 preconcentrator에 흡착된 화합물이 보다 빨리 탈착을 일으킬 수 있도록 한다. 두 번째 예는 그림 8에 나타나 있으며 PCR에 사용된다. Polymethylmethacrylate (PMMA) 위에 니켈을 적층하여 만든 마이크로히터로써 PCR에서는 온도의 상승/하강시간을 최소로 만들어야 polymerase의 감소를 최소화 할 수 있다 [4]. 그림 9는 PCR 과정: 94°C denaturation,

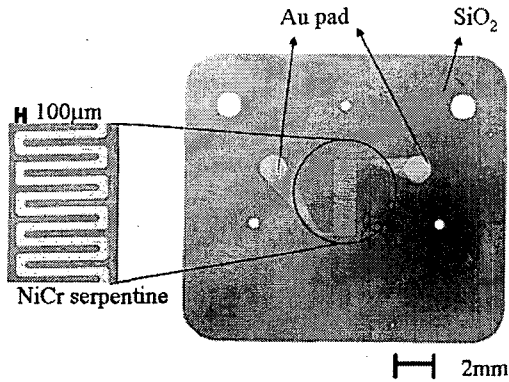


Fig. 6 A microheater for a MEMS pre-concentrator, which is deposited on thermal oxide on $18 \times 16 \times 0.05 \text{mm}^3$ silicon chip. The microheater is heated to 200°C .

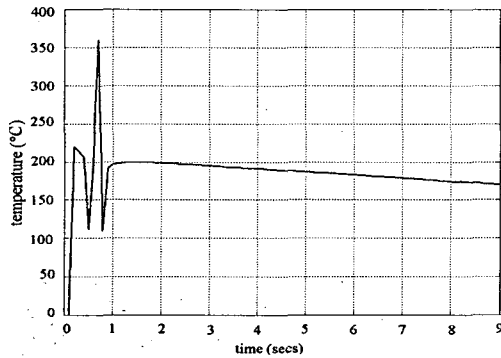


Fig. 7 The transient temperature profile of a NiCr microheater using the control system that reaches 200°C within 0.5secs which is desired for a fast desorption rate.

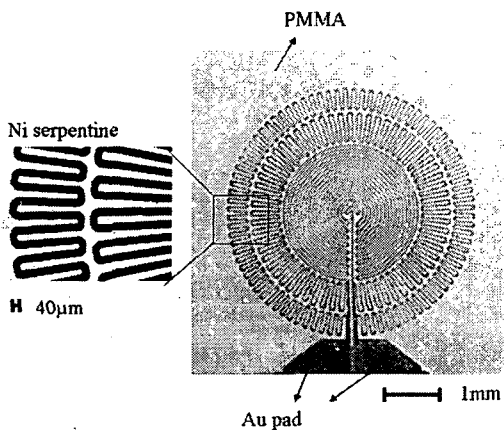


Fig. 8 A nickel microheater deposited on polymethyl-methacrylate in a PCR chip.

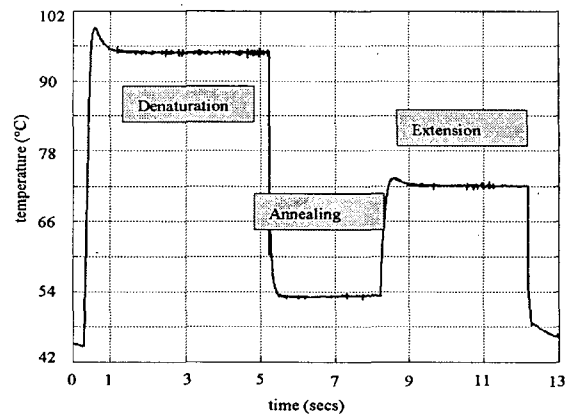


Fig. 9 The PCR transient temperature profile tracking the steps for denaturation at 94°C , annealing at 54°C , and extension at 72°C with heating rate of 100°C/s .

54°C annealing, 72°C extension을 추종하는 온도변화율 100°C/s 의 온도 파형을 보여주고 있다. 위의 두 예제들은 별도의 온도센서 없이 히터의 온도상수만을 이용하여 여러 다른 종류의 마이크로히터의 온도제어를 빠르게 원하는 값으로 제어할 수 있는 MEMS 온도제어시스템의 성능을 보여준다.

4. 결론 및 추후과제

캘리브레이션을 통해 열저항 계수를 구하여 별도의 온도센서가 필요없는 다용도 MEMS 마이크로히터 온도제어시스템을 구성하고 이를 실제의 마이크로히터에 적용시켜 보았다. Pre-concentrator에 사용되는 단일온도 추종의 마이크로히터와 PCR의 denaturation-annealing-extension의 다중온도 프로파일을 추종하는 마이크로히터의 온도제어까지 히터의 재질과 저항값, 그리고 추종 온도 프로파일에 관계없이 두루 사용가능함을 확인하였다. 추후 과제는 캘리브레이션 과정을 간소화하고 별도의 셋업이 필요 없는 MEMS 마이크로히터 셋톱박스를 구성하려고 한다.

감사의 글

이 논문은 2005년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2005-214-D00229)과 Micro-Nano-Mechanical Systems Lab, University of Illinois의 지원을 받아 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] A. Jain, K. Ness, A. McConnell, L. Jiang, and K. Goodson, "Design, Fabrication and Thermal Characterization of a MEMS Device for Control of Nerve Cell Growth," *ASME IMECE*, D.C., Nov. 16-21, 2003.
- [2] W.-C. Tian, S. W. Pang, C.-J. Lu, and E. T. Zellers, "Microfabricated Preconcentrator - Focuser for a Microscale Gas Chromatograph," *J. of MEMS*, Vol. 12, No. 3, pp. 264-272, June 2003.
- [3] M. Graf, D. Barrettino, P. Kaser, J. Cerda, A. Hierlemann, and H. Baltes, "Smart Single-Chip CMOS Microhotplate Array for Metal-Oxide-Based Gas Sensors," *Transducers '03, 12th Intl. Conf. on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems*, Boston, pp. 123-126, June 8-12, 2003.
- [4] D.-S. Lee, S.-H. Park, H. Yang, T.- H. Yoon, S.-J. Kim, H. Kim, Y.- B. Shin, K. Kim and Y.- T. Kim, "Sub-Microliter-Volume PCR Chip with Fast Thermal Response and Very Low Power Consumption," *7th Int. Conf. on Miniaturized Chemical Biochemical Analysis Systems*, pp. 187-190, Oct. 5-9, 2003.