

다양한 형상을 갖는 마이크로 히터의 열특성에 관한 실험 및 전산해석적 연구

김진우[†]·김재춘^{*}·이준엽^{*}·정진택^{**}

Experimental and Numerical Study of Thermal Properties about various forms of Micro-heater

Jin Woo Kim, Jae Choon Kim, Jun Yub Lee and Jin Taek Chung

Key Words: Micro-heater(마이크로 히터), Temperature distribution(온도 분포), Heat generation(발열량)

Abstract

As a field of MEMS, micro-heater fabricated by Au is being introduced and developed in recent years. Previous studies about thermal properties of various forms of micro-heater were not sufficient. In this work, numerical and experimental analysis of the heat generation and the temperature distribution of micro-heater packages for 8 different geometric cases were studied. We fabricated a micro-heater package with silicon wafer, on which Cr/Au layer was laminated before 8 geometric forms of micro-heater were patterned. In each cases, temperature distribution was measured with IR thermal camera. According to the experimental results, which show a good agreement with the results analyzed by CFD, it was found that at 0.5W, the temperature of micro-heater chip which contained 20000 μ m-long, serpentine shaped micro-heater was elevated to a relatively high temperature of 78 $^{\circ}$ C. Consequently, we proposed a geometry of micro-heater which has effective thermal characteristics.

기호설명

l : 마이크로 히터 길이 (mm)

w : 마이크로 히터 폭 (mm)

A_i : 마이크로 히터 단면적 (m^2)

R_i : 마이크로 히터 저항 (Ω)

ρ : 밀도 (kg/m^3)

P : 전력 (W)

V : 전압 (V)

U : 속도 (m/s)

T : 온도 ($^{\circ}$ C)

h : Enthalpy (kJ/kg)

p : 압력 (N/m^2)

τ : Stress tensor (kg/m^2)

λ : 열전도도 (W/mK)

S_M : Mass source (kg/m^3)

S_E : Energy source (W/m^3)

[†] 고려대학교 기계공학부 대학원

E-mail : jchung@korea.ac.kr

TEL : (02)3290-3758 FAX : (02)928-9766

^{*} 고려대학교 기계공학부 대학원

^{**} 고려대학교 기계공학부

1. 서 론

최근 미세가공기술의 발달로 각종 전기-전자, 기계시스템이 소형화 되고 있는 바 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)의 한 분야로서 Au를 이용한 마이크로 히터의 제작과 성능에 대한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 이와 더불어 가스 센서, 진공 센서, 유량/유속 센서 등을 최적화된 동작온도를 유지한 상태에서 작동하기 위하여 미세발열체인 마이크로 히터가 개발되고 있다.^(1,2) 현재까지 실리콘 미세가공기술을 이용한 마이크로 히터의 제작 및 동작특성에 관한 연구가 가속화되고 있으나, 히터의 형상에 따른 마이크로 히터 모듈의 열적 특성에 관한 연구는 미비한 상태이다.⁽³⁾ MEMS에 기초한 마이크로 히터는 그 형상에 따라 서로 다른 열 특성을 지니게 되므로 각 벽면에서의 열 출입량과 전체적인 열 손실량을 정확히 예측하고 검증하는 작업은 발열량 및 온도분포에 있어서 보다 효율적인 마이크로 히터 형상을 제시할 것으로 기대된다.⁽⁴⁾

본 연구에서는 Si기판에 Cr/Au를 증착시킨 후 그 위에 8가지 다른 형상의 마이크로 히터를 식각한 마이크로 히터 모듈을 제작하였다. 그리고 마이크로 히터의 형상에 따른 마이크로 히터 모듈의 열적 특성을 실험적으로 측정하였으며 측정 데이터를 전산해석 결과와 비교 해석하였다. 이를 바탕으로 열적 특성이 우수한 마이크로 히터의 형상을 제안할 수 있었다.

2. 수치해석

마이크로 히터는 마이크로 히터 모듈의 온도를 일정온도로 높여주는 역할을 하는데 이를 위해 필요한 소모 전력을 낮추기 위하여 case별로 제작된 마이크로 히터의 형상에 대한 3차원 CFD 해석을 하였다. 본 연구에서 사용한 전산 해석 프로그램은 FVM(Finite volume method)에 기반을 둔 CFD상용 프로그램인 Flotherm이다. Fig.1은 전산해석모델의 격자생성을 보여준다. 총 격자수는 약 1,200,000개였다. 마이크로 히터의 형상에 따

라 8case로 모델링을 하였으며 각 case의 마이크로 히터에 대한 형상 및 정확한 수치는 Fig. 및 Table.1에 나타내었다. Table.1에 나타나 있는 각각의 case에 대한 4가지 마이크로 히터 모델들의 길이와 폭은 동일한 전압 하에서 전력에 따른 히터의 발열량 및 온도분포를 예측하기 위하여 임의적으로 선정된 히터의 저항 값에 기초하여 결정된 수치들이다.

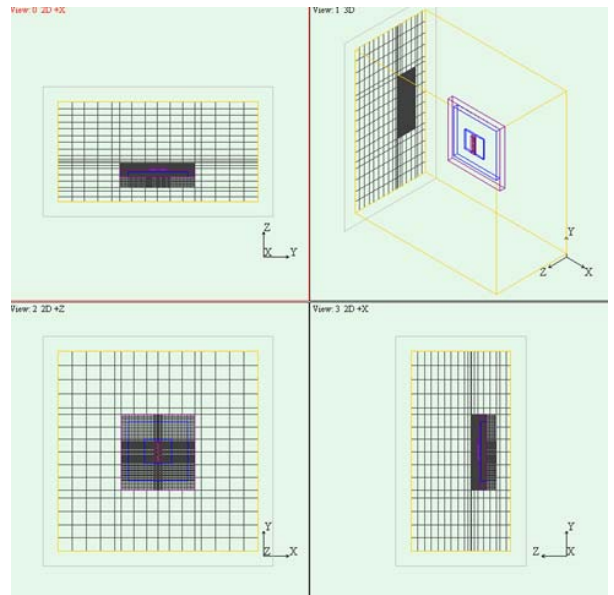


Fig.1 Geometrical view of the computational model

동일한 전압 하에서 마이크로 히터에서의 열 생성은 Eq.1에서 볼 수 있듯이 마이크로 히터의 전기저항 값에 의해 결정된다.

$$P = \frac{V^2}{R_i} \quad (1)$$

단, 재료의 저항 값은 온도에 따라 변하는데 Au는 TCR(Temperature coefficient of resistant)값이 매우 안정적이어서 마이크로 히터 물질로 선정되었다. 따라서 마이크로 히터의 저항 값은 Eq.2와 같이 길이와 폭에 의해서만 결정된다고 가정할 수 있다.

$$R_i = \rho_{Au} \times \frac{l_i}{A_i} \quad (2)$$

각 case의 4가지 모델들에 대하여 동일한 전압을 인가하였을 때 마이크로 히터에서의 열 생성은 각각의 저항 값에 따른 joule-heating법에 의해 계산되었으며 그 값들은 0.1W, 0.15W, 0.225W, 0.3W였다.⁽⁵⁾

외기 온도 및 유리 기판의 온도는 본 연구에서 수행된 모든 전산 해석에 관하여 20℃로 고정시켰다. 전도, 대류, 복사의 모든 열전달 형태에 관하여 열전달 해석을 하였으며, 특히 대류열전달 형태는 자연대류로 가정하였다.

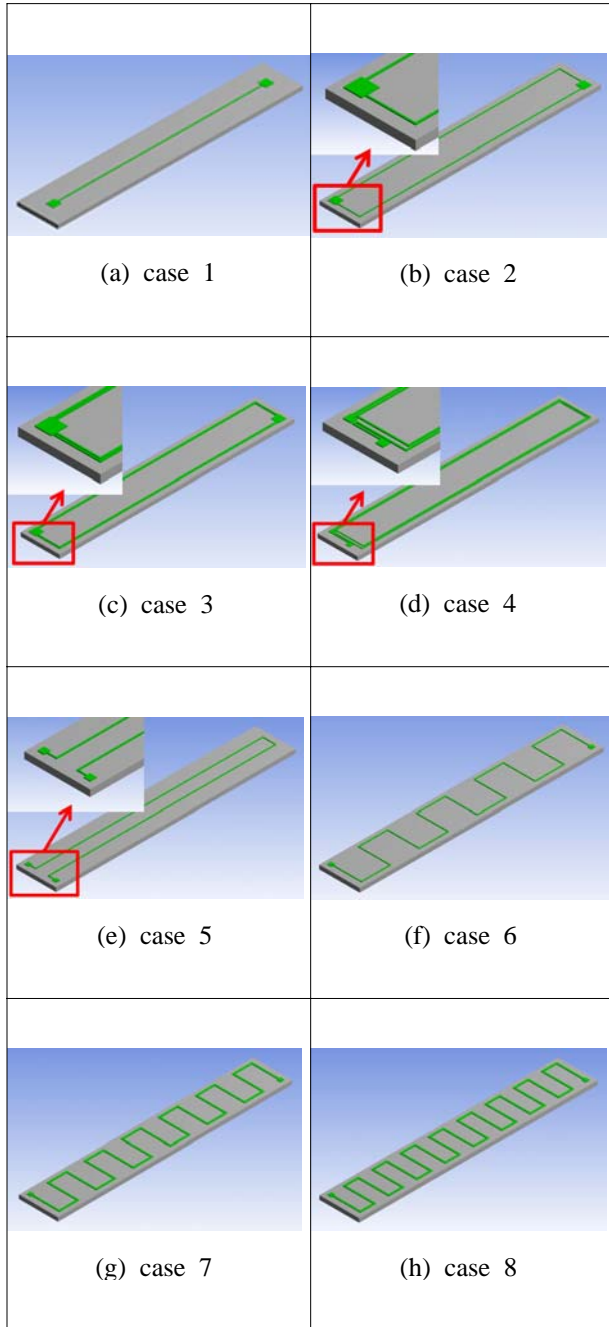


Fig.2 8 different case of micro-heater

Table.1 Geometry of 8 different case of micro-heater

Case	Power(W)	$l(\mu m)$	$w(\mu m)$
1	0.1	8500	6
	0.15		9
	0.225		12
	0.3		17
2	0.1	20400	3
	0.15		4.5
	0.225		6
	0.3		9
3	0.1	40800	1.5
	0.15		2.25
	0.225		3
	0.3		4.5
4	0.1	40500	35
	0.15		40
	0.225		50
	0.3		75
5	0.1	19000	15
	0.15		20
	0.225		30
	0.3		40
6	0.1	20000	15
	0.15		20
	0.225		30
	0.3		40
7	0.1	20000	15
	0.15		20
	0.225		30
	0.3		40
8	0.1	20000	15
	0.15		20
	0.225		30
	0.3		40

히터의 발열량이 대기 중으로 방출되는 열량 및 유리 기판으로 방출되는 열량과 균형을 이룰 때 마이크로 히터 발열체의 온도분포는 정상상태가 되고 이때의 발열량 및 온도분포를 다음과 같은 지배방정식으로부터 계산하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \quad (5)$$

$$\nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (U \cdot \tau) + U \cdot S_M + S_E$$

Eq.5에서 $U \cdot S_M$ 항은 외력에 의한 일을 뜻하며 본 전산해석에서는 무시되었다. 그리고 S_E 는 Joule heating법으로 계산되었다. 마이크로 히터 모듈과 유리 기판의 접촉면은 단열조건으로 가정하였다. Fig.3은 0.15W의 전력이 인가되었을 때의 case7의 해석결과를 보여주고 있다. 평균온도는 42.4℃로서 마이크로 히터 모듈에서의 전력대비 가장 높은 발열량을 나타내고 있으며 온도분포 또한 매우 균일하였다.

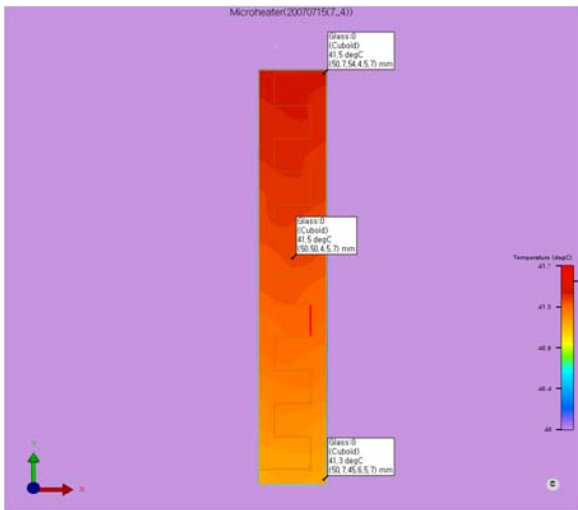


Fig.3 Temperature distribution in micro-heater module

3. 실험

3.1 마이크로 히터 패키지 제작 공정

마이크로 히터는 일반적인 MEMS공정을 이용하여 만들어진다. Fig.4은 본 실험에서 제작된 마이크로 히터 모듈의 제작과정이다. 베이스 기판으로 사용된 0.525mm두께의 실리콘 웨이퍼 위에 절연율 및 유전율을 높이기 위해 SiO2막을 PECVD공정으로 성장시켰다. 그 위에 30nm두께의 Cr막과 300nm두께의 Au막을 EBM(E-beam Evaporation)으로 차례로 증착시켰다. 이때 Cr막은 저항 및 Au막을 실리콘 웨이퍼에 부착시켜주는 역할을 한다. Au막 위에 고집적 반도체 공정에

유리한 양성감광제(Positive photoresist)를 증착시킨 후 광노광법(Photolithography)으로 원하는 마이크로 히터 형상을 패터닝하였다. 그리고 건식식각(Dry etching)으로 마이크로 히터의 제작에 사용되지 않는 금속 층을 제거하여 마이크로 히터 모듈을 제작하였다. 실험 시 각각의 마이크로 히터 형상에 대하여 동일한 전압조건 하에서 전력에 따른 발열특성을 측정해야 한다. 그러므로 각 case에 대하여 전산해석에서 모델링했던 수치(Table.1)에 따라 마이크로 히터를 광노광법으로 패터닝하여 8가지 case별로 4가지씩 총 36종류의 마이크로 히터를 제작하였다.

Fig.5는 위 방법으로 제작된 마이크로 히터 모듈이 장착되어 있는 마이크로 히터 칩의 개략도를 보여주고 있다.

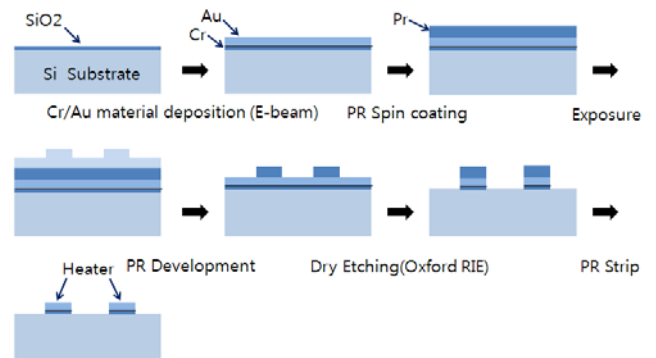


Fig.4 Schematic of micro fabrication process flow

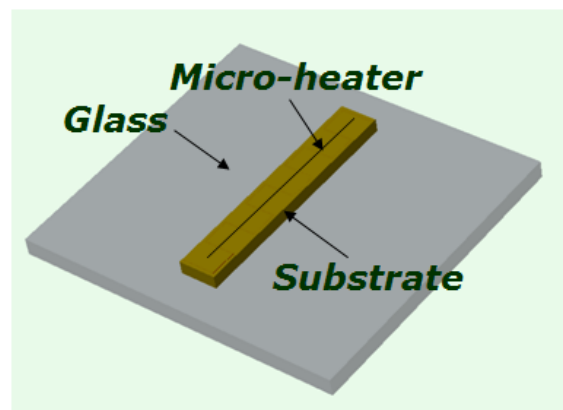


Fig.5 Schematic of micro-heater package

3.2 발열량 및 온도분포 측정

마이크로 히터 모듈의 온도는 IR카메라 및 열전대(Thermo-couple)를 이용하여 측정되었다. 실험에 앞서 테스트 섹션인 마이크로 히터 모듈이 모든 부분에 있어서 동일한 방사율을 갖지 않는다. 이에 따른 IR카메라에 의한 온도분포 측정 오차를 줄이기 위하여 마이크로 히터 칩의 테스트 섹션 부위에 Black-spray($\epsilon=0.97$)를 페인팅하여 방사율을 동일하게 조정한 후 열전대(Thermo-couple)를 이용하여 테스트 섹션의 실제 온도를 측정하여 IR 적외선 카메라로 측정되는 온도와 비교하여 온도보정을 하였다. 또한 마이크로 히터에 정확하게 제어된 미세 전류를 흘려주기 위하여 Prove station 이용하였다. Fig.6은 온도측정 실험과정을 보여준다. 그리고 IR카메라의 사양은 Table.2에 나타내었다.

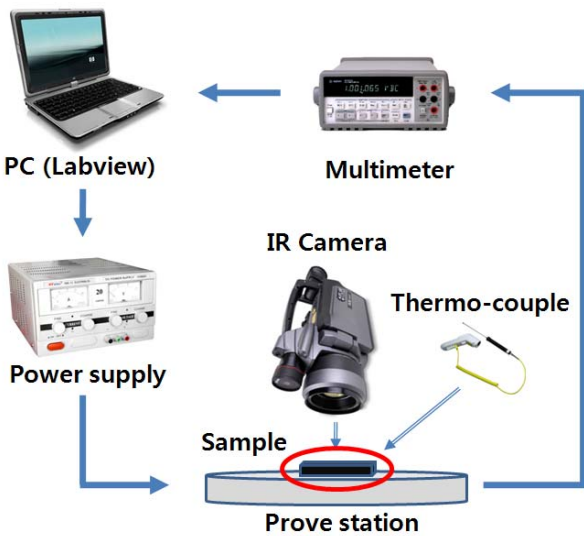


Fig.6 Experimental set-up for measuring temperature distribution of micro-heater module

Table.2

Pixel number	320*240pixel
1 Pixel area	100 micro m2
Sample rate	60Hz

8가지 case 각각의 경우에 대하여 동일한 전압을 인가하였을 때 마이크로 히터 폭에 의해 0.1W, 0.15W, 0.225W, 0.3W의 전력을 생성되었고 그에 따른 온도분포를 IR 카메라를 이용하여 측정하였다. 정상상태에 도달한 마이크로 히터 모듈의 온도를 측정하기 위하여 전력이 인가된 후 10초후의 온도분포를 측정하였다. 외기온도는 26도였고 습도는 52%였다. Fig.7에 마이크로 히터(case7)에 0.1W의 전력이 인가되었을 때 IR 카메라로 측정한 마이크로 히터 모듈의 온도분포를 나타내었다. Fig.8에 나타나있는 그래프와 같이 인가된 전력에 따른 각 case별 마이크로 히터 모듈의 평균온도는 전력이 증가함에 따라 선형적으로 증가함을 실험을 통해 확인할 수 있었다. 또한 serpentine 구조의 마이크로 히터가 패터닝되어 있는 case7, case8, case9의 경우가 다른 경우에 비하여 마이크로 히터 모듈의 평균온도가 비교적 높게 유지됨을 관찰할 수 있었다. 특히 case7의 경우에 동일한 전력을 인가하였을 때 다른case에 비하여 마이크로 히터 모듈의 온도가 3C정도 높게 유지된다는 것을 확인할 수 있었다. 이는 마이크로 히터의 serpentine 형상이 갖는 구조적 특성으로 인해 마이크로 히터에서 마이크로 히터 모듈로의 열전달이 활발히 일어난다는 것과 마이크로 히터 및 마이크로 히터 모듈에서 외기 및 유리 기관으로의 열손실이 감소한다는 것을 확인시켜준다.

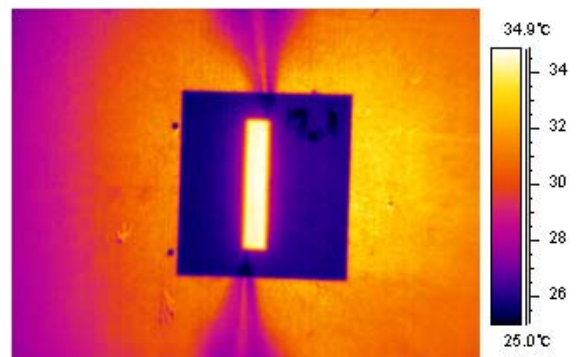


Fig.7 Temperature distribution of the micro-heater package

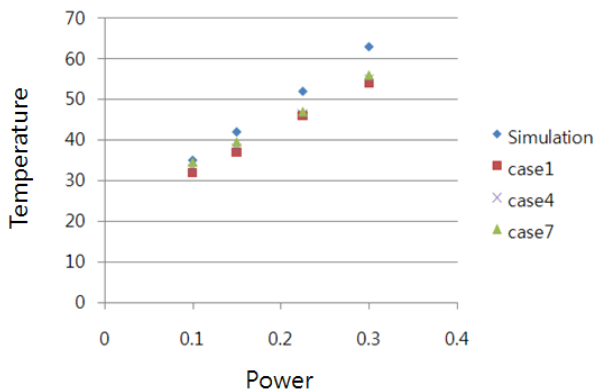


Fig.8 Temperature distribution of micro-heater module in case1, case4, case7 and simulation result of case7

4. 결 론

MEMS 공정을 이용하여 제작된 미세발열체의 하나인 마이크로 히터가 장착되어 있는 마이크로 히터 패키지를 제작하여 실험적으로 측정된 마이크로 히터 모듈의 온도분포를 전산해석 결과와 비교 해석해본 결과 열적 특성이 우수한 마이크로 히터의 형상을 제안할 수 있었다. 실험 데이터가 수치해석 데이터보다 열손실이 많았는데 이는 실험 시 유리 기판으로의 열손실에 해당된다. 결론적으로 serpentine형상의 마이크로 히터를 내장한 마이크로 히터 모듈은 유리 기판 및 외기로의 열손실이 다른 형상에 비해 상대적으로 작아서 보다 적은 소비전력으로 마이크로 히터 모듈의 온도를 보다 높게 유지할 수가 있었다.

본 연구의 마이크로 히터의 발열특성에 Joule-heating기법을 활용한 전산해석기법은 다른 특정한 형상의 마이크로 히터의 발열특성을 관찰할 때 유용하게 사용될 수 있을 것이다. 본 연구에서 사용된 방법으로 검증된 우수한 열특성을 가진 serpentine형상의 마이크로 히터는 각종 가스 센서의 센서박막에 보다 적은 소비전력으로 균일한 온도장을 형성하는데 도움이 될 것이다.

후기

본 연구는 삼성전기가 지원한 2006-2008 산학연 공동연구 개발사업(초소형/고효율/초저 NOISE 광변조 소자의 기계/전기/열적 특성 분석 및 구조 제안)연구의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Lin. L. Pisano. A. P. and Carey. V. P., 1998, "Thermal bubble formation on polysilicon micro resistor," ASME J. Heat Transfer, 120, pp.735-742.
- (2) R. G. Jonson and R. E. Higash, 1963, "A Highly Sensitive Silicon Chip Microtransducer For Air Flow And Differential Pressure Application", Sensors and Actuator, pp. 11-63
- (3) S.G. Kandlikar, 2002, "'Fundamental issues related to flow boiling in minichannels and microchannels'", Exp. Therm. Fluid Sci. Vol. 26, pp. 389-407.
- (4) J. Abadie, 2002, "An integrated shaped memory alloy micro-actuator controlled by thermoelectric effect" Sensors and Actuators A Vol.99. 297-303
- (5) N. Cordero, J. West and H. Berney, April. 2006 "Thermal Management of a Joule-heating Microreactor using Modelling Tools" The 4th Int. Conf on Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems, EuroSimE, pp. 1-7