

유동형 미세 열유속 센서의 설계

Design of The Micro Fluidic Heat Flux Sensor

김정균¹, 조성천¹, 이선규^{1,✉}

Jung-Kyun Kim¹, Sung-Cheon Cho¹ and Sun-Kyu Lee^{1,✉}

¹ 광주과학기술원 기전공학과 (Department of Mechatronics, Gwangju Institute of Science and Technology.)

✉ Corresponding author: skyee@gist.ac.kr, Tel: 062-970-2388

Manuscript received: 2009.5.12 / Accepted: 2009.7.17

A suspended membrane micro fluidic heat flux sensor that is able to measure the heat flow rate was designed and fabricated by a complementary-metal-oxide-semiconductor-compatible process. The combination of a thirty-junction gold and nickel thermoelectric sensor with an ultralow noise preamplifier, low pass filter, and lock-in amp has enabled the resolution of 50 nW power and provides the sensitivity of 11.4 mV/ μ W. The heater modulation method was used to eliminate low frequency noises from sensor output. It is measured with various heat flux fluid of DI-water to test as micro fluidic application. In order to estimate the heat generation of samples from the output measurement of a micro fluidic heat-flux sensor, a methodology for modeling and simulating electro-thermal behavior in the micro fluidic heat-flux sensor with integrated electronic circuit is presented and validated. The electro-thermal model was constructed by using system dynamics, particularly the bond graph. The electro-thermal system model in which the thermal and the electrical domain are coupled expresses the heat generation of samples converts thermal input to electrical output. The proposed electro-thermal system model shows good agreement with measured output voltage response in transient state and steady-state.

Key Words: Heat Flux Sensor (열유속 센서), Heater Modulation (히터 모듈레이션), Thermopile (서모파일)

기호설명

C : Capacitance

c_p : Specific heat

h : Convection heat transfer coefficient

I : Current

l : Length

\dot{q} : Heat flow rate

R : Resistance

r : Width of heater

T : Temperature

t : Time

V : Voltage

ω : Frequency

ϕ : Phase lag

Subscripts

AC : AC component

DC : DC component

e : Electrical domain

heater : Heater

out : Lock-in Amp. output

th : Thermal domain

ref : Reference component

ω : ω frequency component

$2\omega : 2\omega$ frequency component

1. 서론

온도, 열유속 등과 같은 경계조건(boundary condition)은 열 해석에 있어서 매우 중요한 역할을 하기 때문에 열전달 현상을 정밀하게 분석하기 위한 다양한 측정방법의 연구들이 진행되어 왔다. 그 중에서도 열유속의 측정은 열전달량의 값과 직접적으로 관계되기 때문에 열에너지를 분석하는 분야에서 항상 중요하게 논의되는 분야이다.¹ 열유속 센서의 경우 적외선 센서, 열전 가스 센서, 열유동센서 등, 미세 온도, 열류량 측정용으로 다양한 분야에서 사용되고 있다.²⁻⁴ 본 연구에서는 생체 조직의 발열 특성 파악에 사용할 목적으로 개발된 유동형 미세 열유속센서의 제작 공정과 센서의 측정 결과를 보여준다. 또한, 저주파 노이즈를 감소시키는 히터 모듈레이션 방법을 이용하여 센서의 분해능을 향상시켰다. 생체 조직의 발열 특성 측정 시의 센서의 유동 상태에서의 측정 성능을 확인하기 위해 여러 발열량을 가지는 초순수물(deionized water)을 이용하여 센서의 출력을 확인하였다. 마지막으로, 센서의 출력을 이용하여 정확한 발열량을 예측하기 위한 센서와 전기 회로부를 포함한 전체 시스템의 모델링을 하였고, 실제 측정값과의 비교를 통하여 개발된 모델링을 검증하였다.

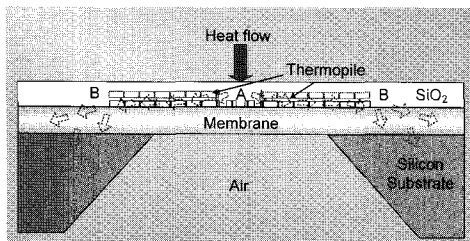


Fig. 1 Schematic diagram of a heat flux sensor

2. 센서 원리

열유속 센서는 기계적인 가공 혹은 MEMS 가공을 통해 서모파일(thermopile)의 구조를 갖도록 제작된 센서이다. 서모파일은 지백 효과(Seebeck effect)에 의해 열전쌍에서 발생하는 열기전력을 증폭하기 위해 열전쌍이 직렬로 2 개 이상 연결되어 있는 구조이다.⁵⁻⁷ 서모파일은 열전쌍의 연결 개수

만큼 열기전력을 증폭시키는 역할을 한다. Fig. 1 은 열유속 센서의 단순화된 모습으로 센서 내부의 구조를 알기 쉽게 표현하고 있다. 열유동이 서모파일의 점 A 와 B 사이를 흐르는 경우 서모파일의 양단에는 온도 차가 발생하고 이에 비례하는 열기전력 신호가 서모파일을 통해 증폭되어 온도 차에 비례하는 열유속 신호를 전압신호 형태로 표현할 수 있고, 센서에 입력된 열류의 측정과 발생한 전압 값을 이용하여 열유속을 알 수 있다. Fig. 1 과 같이 열유속 센서의 얇은 박막형 구조는 낮은 열전도율의 공기로 둘러 쌓여 단열 효과를 일으키며 발생한 열유동이 열흡수원의 역할을 하는 실리콘 기판으로 흐르게 한다.

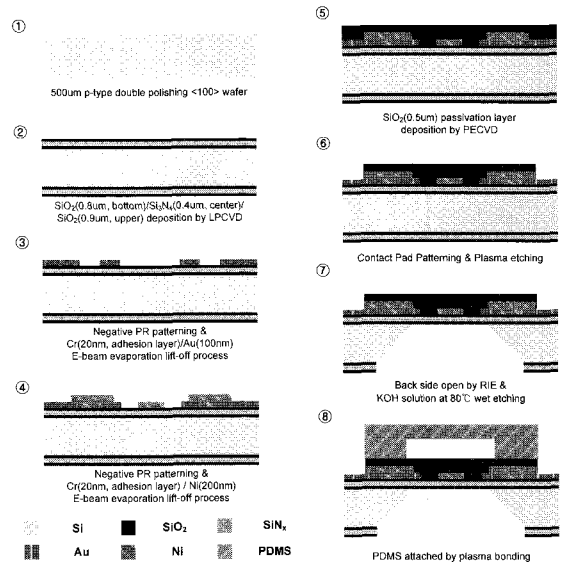


Fig. 2 Fabrication process

3. 센서 제작

Fig. 2 는 유동형 미세 열유속 센서의 제작 공정을 나타낸 것이다. 먼저 500 μ m 두께의 p 타입 양면 연마 가공이 된 웨이퍼에 LPCVD 공정을 이용하여 SiO₂ 를 0.8 μ m, Si₃N₄ 를 0.4 μ m 각각 증착하고, PECVD 공정을 이용하여 SiO₂ 를 0.9 μ m 증착한다. 다음으로 열전쌍을 이루는 Au 을 웨이퍼에 증착하기 위해 negative P.R.을 쌓아 패턴을 형성한 후, Cr/Au 를 E-beam 을 이용하여 Cr 를 20nm, Au 를 100nm 각각 쌓고, 아세톤으로 더미 P.R.을 제거해 패턴을 형성하는 Lift-off 공정을 진행한다. 또, 열전쌍과 미세 히터를 이루는 Ni 을 웨이퍼에 형성

하기 위해 negative P.R.을 쌓아 패턴을 형성한 후, Cr/Ni 를 E-beam 을 이용하여 Cr 를 20nm, Ni 를 200nm 각각 쌓고, 동일하게 Lift-off 공정을 진행한다. 여기서 Cr 은 adhesion layer 의 역할을 한다. Passivation layer 를 형성하기 위해 PECVD 공정을 이용하여 SiO_2 를 $0.5\mu\text{m}$ 쌓는다. 센서의 패드를 형성하기 위해 negative P.R.을 쌓아 패턴을 형성한 후, Plasma etching 기법을 이용하여 식각한다. 다음으로 웨이퍼 후면 식각을 RIE 나 KOH 를 이용하여 진행하여 면적 $700 \times 700 \mu\text{m}^2$ 의 박막을 형성한다. 유체 채널을 형성하기 위해 PDMS 를 사용하고, Plasma 를 이용 센서에 접착시킨다. Fig. 3 은 제작 완성된 유동형 미세 열유속 센서의 평면도를 보여주고 있다. 정가운데에는 센서 특성 파악과 측정 분해능 향상을 위한 미세 히터와 서모파일이 위치하고, 주변부에 주위 온도 보상을 위한 서미스터(thermistor)가 보인다.

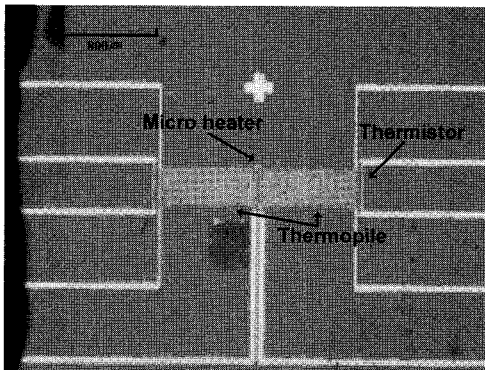


Fig. 3 Micrograph of the top view of the completed sensor

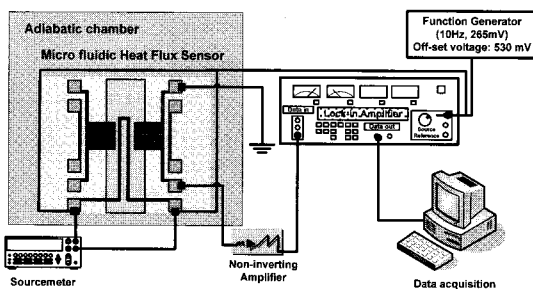


Fig. 4 Schematic diagram of experimental setup

4. 센서특성 검출방식

Fig. 4 는 센서의 측정 분해능과 민감도를 측정

하기 위한 미세 열유속 센서와, 미소신호동기증폭기(lock-in amp.), 소스미터(sourcemeter), 신호획득장치(data acquisition) 등으로 이루어진 실험 구성을 보여준다. 열유속 센서의 측정 분해능 향상을 위해서는 노이즈 해결이 필수이다. 미세 열유속 센서의 경우, 서모파일을 이루는 열전쌍의 접촉노이즈, 센서 주위 환경에 기인한 노이즈와 샘플에서 입력되는 미세한 열류를 분리해 내는 것이 필수적이다. 이러한 노이즈의 제거와 측정 분해능의 향상을 위해서 본 연구에서는 미소신호동기증폭기를 이용한 노이즈 제거 기술을 이용하였다. 주파수 생성기를 이용하여 히터를 가진 시키고, 히터에 입력한 교류 성분을 기준 신호로 미소신호동기증폭기에 통과 시킨다. 이때, 히터에서는 소스미터를 이용하여 미세 전류를 가해 발열시키는 동시에 입력 전류 값과 측정 전압 값을 이용하여 발열량을 계산한다. 최종적으로 미소신호동기증폭기의 출력 값을 데이터 수집장치를 이용하여 수집한다.

미소신호증폭기는 변조 신호와 출력 신호, 이 두 신호를 입력으로 받아들여 혼합(mixing)을 통해 두 신호의 곱을 생성하는데, 그 결과는 식(1)과 같다.

$$V_{out} = [V_{DC} + V_{\omega} \sin(\alpha t + \phi_{\omega}) + V_{2\omega} \sin(2\alpha t + \phi_{2\omega})] \cdot [V_{ref_DC} + V_{ref} \sin(\alpha t)] \quad (1)$$

마지막으로, 저대역 필터를 통과시켜 DC 성분만을 추출하게 되면 식(2)와 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$V_{out} = V_{DC}(V_{ref_DC} - V_{ref}) + \frac{1}{2} V_{\omega} V_{ref} \sin \phi_{\omega} + V_{2\omega} V_{ref} \sin \phi_{2\omega} \quad (2)$$

식(2)에서 알 수 있는 바와 같이, 미소신호동기증폭기를 통해 얻게 되는 신호는 변조 진폭의 크기에 비례하며 DC 성분과 비례하는 특징을 가지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5 는 소스미터를 이용하여 히터에 입력된 입력 열류에 따른 유동형 미세 열유속 센서의 출력 전압을 나타낸다. 센서의 민감도는 입력 열류 $1 \sim 8 \mu\text{W}$ 에서는 $11.4 \text{ mV}/\mu\text{W}$ 이며 높은 선형성을 가진다. Fig. 6 은 센서의 측정 분해능을 미소신호동기

증폭기를 이용한 저주파 노이즈 분리를 이용하여 측정한 실험 결과다. 측정은 소스미터를 이용하여 50nW 에서 310nW 까지 60 초 간격으로 히터에 입력된 입력 열류에 따른 센서의 출력 전압을 나타낸다. 측정 분해능 50nW 를 가지며, 측정 노이즈 전압은 약 4mV 이다. 제작된 센서의 민감도는 Au/p-poly(0.94V/W),⁸ Bisb/Sb(4~6V/W),⁹ GaAs/AlGaAs (145V/W)¹⁰ 등의 여타 열유속 센서 민감도와 비교했을 때 우수한 값을 보이지만, Bisb/Sb(100nW)⁹ 와 Ni/Au(25nW)¹¹ 등의 여타 열유속 센서 분해능과 비교했을 때 유사한 값을 보인다. 실제 Kemp¹² 에 의하여 발표된 포유류 세포의 발열량은 세포당 0.01~329pW 이다. 일반적인 크기 10 μ m 반경을 가지는 포유류의 적혈구 세포의 발열량을 파악하기 위해서는 제작된 센서의 측정 표면 면적을 고려하

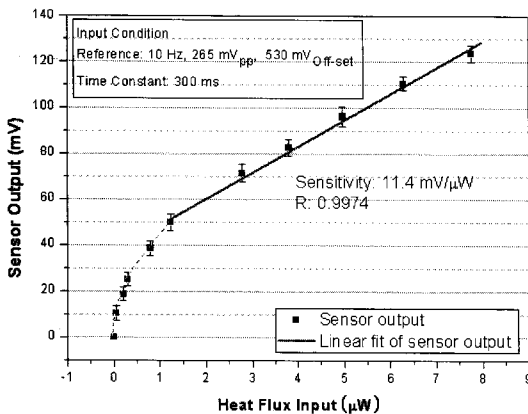


Fig. 5 The calibration of the measured heat flux vs sensor output voltage

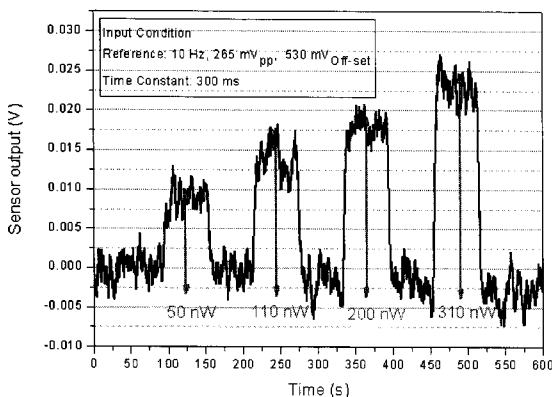


Fig. 6 Resolution of the micro fluidic heat flux sensor with measured sensor output voltage and input voltage on the heater

였을 경우 최대 4900 개의 세포가 측정 가능하다. 이 때, 요구되는 센서의 최소 측정 분해능은 세포에 따라 50nW 에서 1.6 μ W 이다. 한편, 배양액 속에서 세포의 발열은 상당 부분이 센서의 표면이 아닌 배양액으로 전달되므로 정확한 발열 파악을 위해서는 센서의 측정 분해능의 향상이 필요하다.

다음으로 PDMS 로 제작된 유동 채널을 이용하여 생체조직의 발열 특성 파악을 위한 목적으로 개발된 미세 유동형 열유속 센서의 적용 가능성을 알아보기 위한 실험 실험으로 미세 유동 측정 실험을 수행하였다. Fig. 7 은 시린지 펌프, 가열 플레이트, 마이크로 피펫, IR 카메라, 데이터 획득 장치 등으로 이루어진 유동 측정 실험 장치를 나타내고 있다. 시린지 펌프를 이용하여 기준 유체를 850nl/s 의 속도로 흘려주는 동시에 외부에서 일정한 온도로 가열된 초순수를 유동 채널에 주입하였다. Fig. 8 은 각각 다른 온도로 가열된 유체가 센서부위를 통과할 때에 시간에 따른 센서의 반응 측정 실험 결과를 나타낸다. Fig. 9 는 각각의 온도의 초순수를 주입한 경우 유동형 미세 열유속 센서를

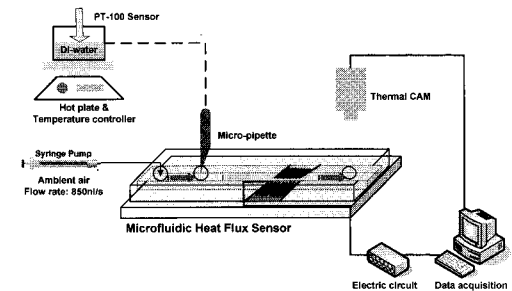


Fig. 7 Schematic diagram of the micro fluidic experimental setup

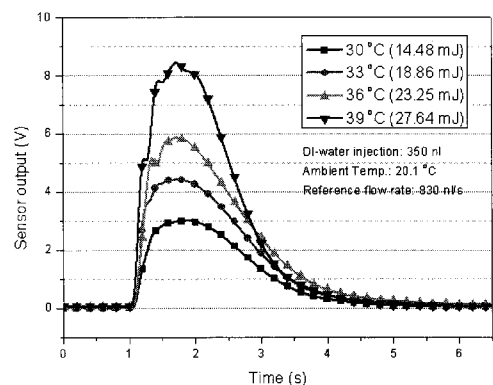


Fig. 8 Sensor output with various temperature DI-water input

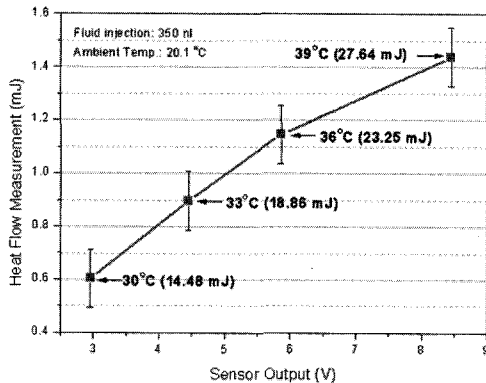


Fig. 9 Heat power and different voltage output with various temperature DI-water input

통하여 측정된 전압 신호와 계산된 발열량을 나타낸다. 측정을 통하여 측정된 전압 신호와 발열량 사이의 선형적 관계를 확인할 수 있었다. 한편, 입력 발열에 비해 측정된 발열량은 실제 입력 발열의 약 1/20 로 많은 부분의 발열이 기준 유체와 외부구조로 전달되었다. 정밀한 유동 측정을 위해서는 단열설계가 필요함을 알 수 있었고, 실제 유동 상태에서의 측정시의 분해능을 예측할 수 있었다.

5. 센서 시스템 모델링

다음으로 센서의 출력을 이용하여 정확한 발열을 예측하기 위한 센서 시스템의 모델링을 수행하였다. 본 연구에서는 시스템 다이내믹 수법의 하나인 본드 그래프를 이용한 센서 시스템을 모델링하였다. 본드 그래프는 각 요소간 파워의 흐름에 따른 그래프 이론을 기반으로 한 모델링 방법으로 열, 구조, 전기, 전자기 등이 결합된 다중물리 시스템의 해석에 유용한 기법이다. 본드 그래프 모델링에서 화살표 모양의 모든 본드(bond)는 effort 변수와, flow 변수를 갖는다. 열 시스템의 경우 온도와 열류가 각각 effort 변수와 flow 변수를 나타내고, 전기 시스템의 경우 전압과 전류가 각각 effort 변수와 flow 변수를 나타낸다. '0' 요소는 연속된 일률을 나타내고, 주위 flow 변수의 합은 항상 0 이고, 주위 effort 변수의 값은 모두 같다. 반면, '1' 요소는 연속된 일률을 나타내고, 주위 effort 변수의 합은 항상 0 이고, 주위 flow 변수의 값은 모두 같다. 열 시스템에서 '0' 요소는 열전 노드(node)를 나타내고, '1' 요소는 열저항 요소와 결합되어 열류의 경로를 나타낸다.¹³

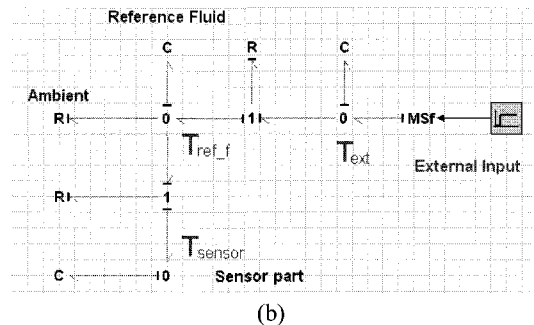
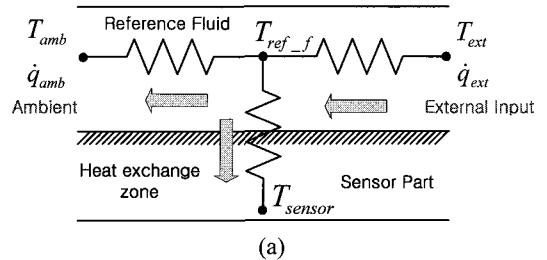


Fig. 10 (a) Heat flow model of fluid channel, (b) Bond graph model of fluid channel

열시스템의 경우 모델링을 열저항(R_{th})과 열용량(C_{th})로 표현되는 열네트워크 시스템으로 표현할 수 있다. Fig. 10 은 유동형 미세 열유속 센서의 유동 채널부에서의 열전달 과정을 열네트워크로 변환한 모델과 이를 상용 '20-Sim' 프로그램을 이용하여 본드 그래프 기법으로 개발된 모델링을 보여준다. 유동 채널에 주입된 외부 발열은 기준 유체를 통과하며 일정량의 발열을 센서부에 전달하며 외부 대기로 방열된다. Fig. 11 은 본드 그래프 기법으로 개발된 센서부의 전체 모델링을 보여준다. 센서부의 모델링에는 센서의 특성 파악을 위한 히터부분과 측정 부분의 서모파일 구조, 유동

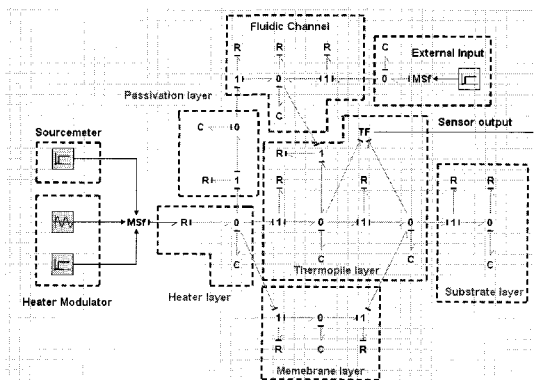


Fig. 11 Bond graph model of heat flux sensor part

상태에서의 측정을 위해 제작된 유체 채널 모델링이 포함되어 있다. 히터에서 발생한 발열은 센서의 보호막을 거쳐 유동채널과 서모파일 구조로 열전달이 발생한다. 이와 동시에 유동채널에 주입된 발열은 서모파일 구조와 히터부로 열전달이 발생한다. 최종적으로 센서부내에서의 발열은 유동채널을 통한 대기와 센서 기관을 통해 대기로 방열된다. 또한, 모델링에는 센서 출력의 노이즈 제거를 위해 히터 모듈레이션 기법을 이용한 교류와 발생기부와 히터의 발열 입력을 위한 소스미터 부분의 전기적 시스템이 결합되어 있다.

본 연구에서는 신호의 증폭과 노이즈 제거를 위하여 Fig. 12 과 같이 앰프와 미소신호동기증폭기가 결합된 전기 시스템을 이용하였다. 전기 시스템 모델링의 경우 수동 소자인 저항과 콘덴서는 본드 그래프 모델링의 ' R_e '과 ' C_e '요소로 바로 표현 가능하지만, op-amp 와 같은 능동 소자는 본드 그래프 모델링의 개발이 필요하다. Fig. 13(a)는 op-amp 의 등가회로를 나타내고 있고, Fig. 13(b)는 Granda¹⁴ 에 의해 개발된 op-amp 본드 그래프 모델링을 나타낸다. Op-amp 본드 그래프 모델링을 이용하여 저주파통과필터와 앰프의 경우 본드 그래프로 표현이 가능하며, Fig. 14 에서는 저주파통과필터, 앰프가 결합된 전체 전기 시스템을 본드그래프 모델링으로 표현하였다. 앰프 모델링에는 미소신호의 증폭을 위한 비반전 증폭회로 모델링이 본

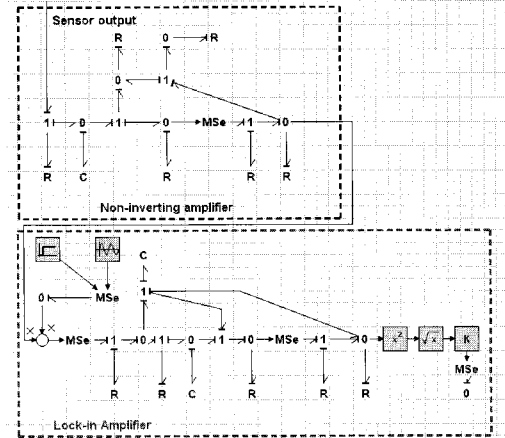


Fig. 14 Bond graph model of electrical circuit part

드그래프를 이용하여 표현되었다. 미소신호동기증폭기 모델링에는 히터 모듈레이션을 위한 교류와 발생기, 변조 신호와 출력 신호의 곱을 위한 혼합기(mixer)와 저주파통과 필터가 포함되어 있다.

모델링이 완성되면, 시뮬레이션 결과를 얻기 위해서는 모델링을 구성하는 각 요소들의 값이 필요하다. 열 시스템의 경우 센서의 물리적 치수와 열전도율과 비열값을 이용하여 열저항과 열용량 값을 알 수 있다. 이 때 미세 히터의 저항 값은 히터의 온도에 따라 변하고, 일정한 전류 값을 히터에 입력하여도 발열량은 히터의 온도에 따라 변하게 된다. 따라서 히터의 저항과 온도의 관계를 ASTM 기준¹⁵에 의해 구했고 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$R_{heater} = 1243 \cdot (1 - 0.0009 T) [\Omega] \quad (3)$$

또한, 센서의 표면에서부터 대기 온도까지의 열저항 값은 실험을 통하여 측정하였다. Fig. 15 는 열저항을 구하기 위한 실험장치 구성을 보여주고 있다. 소스미터를 이용하여 히터에 발열을 주면서, IR 카메라를 이용하여 히터의 중앙 표면에서의 온도 변화를 기록한다. 센서의 표면에서부터 대기까지의 열저항 값은 발열 입력값과, 표면의 온도 변화량과 대기 온도 값을 이용하여 계산할 수 있고 그 값은 6405K/W 이다. 또한, 유동채널과 센서부의 서모파일 구조 사이의 열저항은 초순수를 이용한 미세 유동 측정 실험을 통하여 구한 값을 이용하였다. 한편, 전기 시스템 모델링 경우 저항과 콘

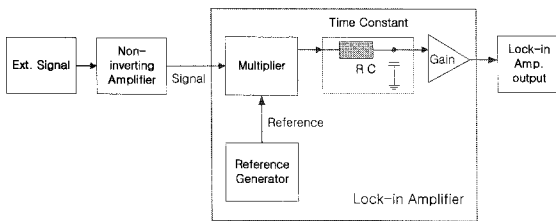


Fig. 12 Overall electrical circuit system

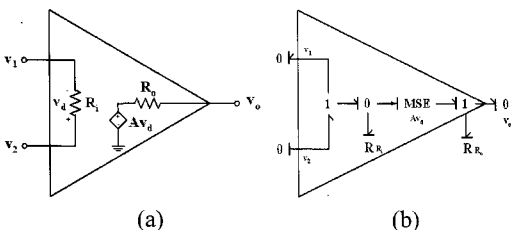


Fig. 13 (a) Equivalent electrical circuit of op-amp, (b) Equivalent bond graph model of op-amp

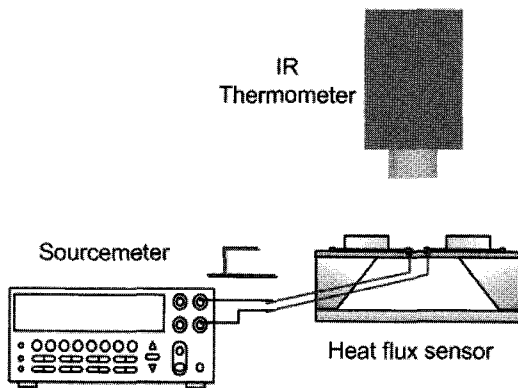


Fig. 15 Schematic diagram of experimental setup for the thermal resistance identification

텐서는 측정값을 이용했으며, Op-amp 는 제조사의 값을 이용하였다.

개발된 센서의 모델링을 실제 측정값과의 비교를 통하여 검증하였다. Fig. 16(a)는 소스미터를 이용하여 1.24W 에서 7.77W 까지의 단계적으로 열류를 계단 입력한 경우 센서의 출력 응답그래프를 보여주고 있고, Fig. 16(b)는 실험과 같은 열류 입력을 한 경우 모델링의 출력 응답그래프를 보여주고 있다. 각 열류 입력에 대하여 시뮬레이션 결과 최대오차 4.2%이내의 실제 측정값과 시뮬레이션 결과가 비슷한 양상을 보여주고 있다.

6. 결론

본 연구에서는 유동형 미세 열유속센서의 제작 공정과 센서의 측정 결과를 보여준다. 열유속 센서는 금과 니켈 30 개의 열전쌍으로 이루어진 서모파일과 센서의 성능 측정을 위한 미세 히터 주위 온도의 보상을 위한 서미스터로 이루어져 있으며, PDMS 를 이용한 유체 채널이 센서 표면에 부착되었다. 히터의 모델레이션 기법을 통한 저주파수 노이즈 분리를 통하여 센서의 측정 분해능은 50nW 를 나타냈고, 센서의 측정 민감도는 11.4 mV/W 이다. 유동 상태에서의 센서 성능을 파악하기 위해 초순수를 이용하여 센서의 출력을 확인하였다. 또한, 발열량 측정시 센서 내부의 전달되는 열전달과 센서의 출력값을 이용하여 정확한 발열량을 예측하기 위해 본드그래프 기법을 이용하여 센서와 전기 회로부를 포함한 센서 시스템의 모델링이 이루어졌다.

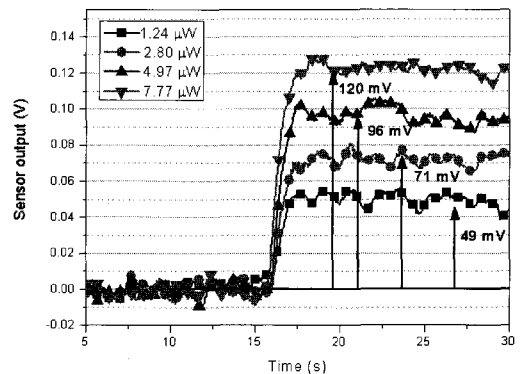


Fig. 16(a) Measured sensor output voltage with various heat flux input

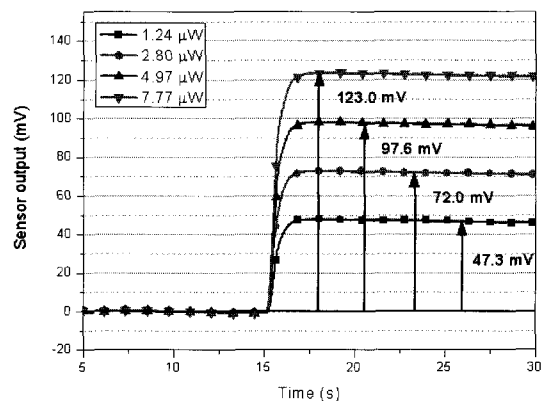


Fig. 16(b) Simulated sensor output voltage with various heat flux input

후 기

본 논문은 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단 국가지정연구실사업의 지원(No. R0A-2008-000-10065)과 광주과학기술원 생체적용나노기술연구센터의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Diller, T. E., "Advances in Heat Flux Measurements-In Advances in Heat Transfer, Vol. 23," Elsevier, pp. 279-368, 1993.
2. Eminoglu, S., Tezcan, D. S., Tanrikulu, M. Y. and Akin, T., "Low-cost uncooled infrared detectors in CMOS process," Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 109, No. 1-2, pp. 102-113, 2003.

3. Matsumiya, M., Shin, W., Izu, N. and Murayama, N., "Nano-structured thin-film Pt catalyst for thermoelectric hydrogen gas sensor," *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 93, No. 13, pp. 309-315, 2003.
4. Buchner, R., Rohloff, K., Benecke, W. and Lang, W., "A high-temperature thermopile fabrication process for thermal flow sensors," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 130-131, pp. 262-266, 2006.
5. Oh, S. H., Jeon, J. C., Kim, M. H. and Lee, S. S., "The micro Heat flux sensor using electroplated copper layers," *J. of the KSPE*, Vol. 17, No. 7, pp. 226-231, 2000.
6. Kim, J. H., Kim, B. S., Cho, H. H. and Kim, Y. J., "Fabrication and evaluation of a micro heat flux sensor using thermopile," *Proc. of the KSPE Spring Conference*, pp. 1210-1213, 2005.
7. Han, E. K., Choi, G. C., Rho, B. O., Park, T. W. and Lee, M. H., "Development of heat flux sensor using adhesive type film gauge for measuring temperature," *J. of the KSPE*, Vol. 9, No. 2, pp. 52-60, 1992.
8. Zhang, Y. and Tadigadapa S., "Calorimetric biosensors with integrated microfluidic channels," *Biosensors and Bioelectronics*, Vol. 19, No. 12, pp. 1733-1743, 2004.
9. Baier, V., Fodisch, R., Ihring, A., Kessler, E., Lercher, J., Wolf, G., Kohler, J. M., Nietzsche, M. and Krugel, M., "Highly sensitive thermopile heat power sensor for micro-fluid calorimetry of biochemical processes," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 123-124, pp. 354-359, 2005.
10. Dehe, A., Fricke, K. and Hartnagel, H. L., "Infrared thermopile sensor based on AlGaAs-GaAs micromachining," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 47, No. 1, pp. 432-436, 1995.
11. Johannessen, E. A., Weaver, J. M. R., Cobbold, P. H. and Cooper, J. M., "A Suspended Membrane Nanocalorimeter for Ultralow Volume Bioanalysis," *IEEE Trans. on Nanobioscience*, Vol. 1, No. 1, pp. 29-36, 2002.
12. Kemp, R. B. and Guan, Y., "Heat flux and the calorimetric-respirometric ratio as measures of catabolic flux in mammalian cells," *Thermochimica Acta*, Vol. 300, No. 1-2, pp. 199-211, 1997.
13. Kim, J. K., Kim, T. H., Cho, S. C., Shin, S. M. and Lee, S. K., "Modeling and fabrication of thin film thermopile sensor," *J. of Va. Sci. Technol. B*, Vol. 27, No. 3, pp. 1466-1472, 2009.
14. Granda, J. J., "The role of bond graph modeling and simulation in mechatronics systems: An integrated software tool: CAMP-G, MATLAB-SIMULINK," *Mechatronics*, Vol. 12, No. 9, pp. 1271-1295, 2002.
15. JEDEC, "EIA/JEDEC Standard No. 51-1, Integrated Circuits Thermal Measurement Method-Electrical Test Method (Single Semiconductor Devices)," JEDEC, pp. 3- 24, 1995.