

히터 모듈레이션을 이용한 열식 유속센서의 성능특성 Characterization of a thermal flow sensor with thermal modulation

*남성기, 김정균, #이선규

*S. K. Nam, J. K. Kim, #S. K. Lee(skyee@gist.ac.kr)
광주과학기술원

Key words : Thermopile, Heater modulation, Thermal air flow sensor

1. 서론

최근 전자 장비들의 소형화와 고집적화, 고효율화에 따라서 전자부품에서 발생하는 단위면적당 발열량이 급격하게 증가하고 있으며, 이러한 발열문제는 시스템이 오동작하거나 고장의 원인이 되고 있다. 이를 해결하기 위해 많은 전자 장비 냉각소자들이 사용되고 있으며, 다수의 냉각소자의 경우 유체의 대류 열전달에 의한 냉각 방식을 취하고 있다. 따라서 대류 열전달에 의한 냉각소자의 경우 냉각부에서의 유속측정은 냉각소자의 성능평가를 위하여 필수적이다. 또한 바이오 나노 디바이스의 경우 미세 유동에서의 유체의 유속측정은 의약품의 정확한 투약, 대기 환경 측정, 반도체 공정에서의 정밀도 향상등 디바이스의 성능 측정 및 특성화를 위하여 필수적이다. 따라서 이러한 미세 유동구조상에서의 유동상태 파악을 위하여 유동을 방해하지 않고, 표면에 실장된 미세 열식 유속 센서(Thermal flow sensor)를 이용할 수 있다.

유속을 측정하는 방법에는 작동원리에 따라 비열식 유속 센서(Non-thermal flow sensor)와 열식 유속 센서(Thermal flow sensor)가 있다.¹ 비열식 유속 센서는 대부분 기계적인 메커니즘을 이용하여 유속을 측정하며 유체의 압력차, 채널내부의 변형, 항력(Drag force), 코리올리 힘(Coriolis force)을 이용한 방식이 있다. 열원을 사용하지 않으므로 에너지 손실이 적고, 열적인 변형이 발생하지 않으나, 다이어프램이나 밸브등의 복잡한 구조가 필요하므로 시스템에 실장되기 어렵다. 반면, 열식 유속센서에는 온도를 측정하는 방식에 따라서 열저항(Thermoresistive), 열전현상(Thermo electrical), 열전자(Thermal electronical), 초전도(Pyroelectrical)방식이 있다. 특징으로는 구조가 간단하고, 전기적인 시스템이 간단하며, 저유속에서도 안정적으로 동작하고 응답속도가 빠르다.

특히 반도체 공정 기술을 통해 만들어진 열전쌍(Thermopile)형 열식 유속센서는 매우 빠른 응답특성과 높은 정확도 등의 열식 유속센서의 장점 뿐만 아니라 열적인 변형, 에너지 손실등 기존의 단점도 보완을 하여 저유속의 측정에 매우 유용하다. 특히 온도센서 중에 열전대 형식은 여타의 RTD, 써미스터(Thermistor)와는 달리 외부전원이 없이 자체적으로 온도차에 비례하는 전압신호를 생성하므로 줄 히팅(Joule heating)문제나 전기회로에서 생성되는 노이즈 문제를 현저하게 줄일 수 있다. 또한 열전대의 개수를 늘림으로써 전압신호의 증폭을 통해 정밀한 측정이 가능하다.

본 연구에서는 반도체 공정 기술 기반의 열전쌍형 열식 유속 센서를 제작하여 채널 내부에 흐르는 유체의 유속에 따른 센서의 출력신호변화를 살펴보았다.

2. 실험 장치 구성

그림 1은 유체의 흐름을 고려한 유동 채널과 유속 측정에 필요한 실험장치를 보여주고 있다. 압축기(Air compressor)와 조절기(Regulator)를 통해 0.65MPa의 압력으로 공기를 공급해주고, 이를 조절밸브(Control valve)를 통해 유속을 제어하였다.

유동채널은 아크릴로 제작하였고, 19 X 7 X 300 mm³의

채널크기를 가지고 있다. 또한 평균유속이 7m/s 이하에서 층류 유동을 하도록 되어 있고, 채널의 끝단에는 유속측정을 위한 풍속계(Anemometer)가 설치되어 있어서 참조값(Reference)을 얻을 수 있다. 이 풍속계는 0.01m/s의 유속 정밀도와 0.5 °C의 온도정밀도를 가진 열선(hot wire) 방식의 상용센서를 사용하였다.

그림 2는 반도체공정으로 만들어진 열식 유속센서의 모습을 보여주고 있다. 히터부분과 열전쌍의 온접점(Hot junction)부분은 온도변화에 민감하도록 막막(Membrane)구조를 하였고, 열전쌍의 냉접점(Cold junction)부분에는 써미스터를 설치하여 일정한 온도를 유지할 수 있도록 하였다. 또한 금(Gold)과 니켈(Nickel)을 이용한 열전대를 통해서 21.9 μV/K의 지벡전압(Seebeck voltage)²을 생성하였고, 30 쌍으로 된 열전쌍을 형성하여 미소한 출력신호를 증폭하였다. 하지만 감응부(Sensing Area)의 한계로 증가시킬 수 있는 열전대의 수가 제한적이므로 op-amp'를 통한 전지전압증폭회로(Preamplifier)를 설계하여 센서의 출력단에서 미소 신호 검출기(Lock-in amplifier)의 입력단까지 발생할 수 있는 노이즈의 발생을 줄였다.

작동과정을 살펴보면, 중앙에 위치한 히터가 함수발생기(Function generator)를 통해서 사인파형으로 모듈레이션(Modulation) 되고(1), 이와 동시에 소스미터(Source meter)를 통해 히터의 발열량(2)을 조절하게 된다.³ 그러면 열이 히터에서 주위로 퍼져나가면서 열 평형식(3)에 의해 온도구배를 생성하게 되고⁴, 열전쌍의 온접점 부분과 냉접점 부분과의 온도차에 비례하는 전압신호가 발생하게 된다. 이때 발생된 신호는 히터의 모듈레이션의 영향으로 교류전압을 생성하게 되고, 함수발생기의 신호와 함께 미소 신호 검출기로 보내지게 된다. 그러면 미소 신호 검출기는 변조신호와 출력신호를 곱한(4) 다음 24dB의 기울기를 가진 저주파 필터(Low pass filter)를 통과하게 되고, 잡음이 제거된 출력신호를 얻을 수 있게 된다.

$$I(\omega) = I_{DC} + I \sin \omega t \quad (1)$$

$$\dot{q}(2\omega) = \frac{I^2 R_h}{Volume} = \frac{I^2}{r^2 l} \cdot \gamma \frac{l}{r^2} \quad (2)$$

$$\equiv \alpha + \beta \cdot \cos \omega t + \chi \cdot \cos 2\omega t$$

$$\rho c_p r^2 l \frac{\partial \theta}{\partial t} = r^2 l \cdot \dot{q} - h \cdot 4rl \cdot \theta \quad (3)$$

$$V_{out} = V_{DC}(V_{ref_DC} - V_{ref}) + \frac{1}{2} V_{\omega} V_{ref} \sin \phi_{\omega} + V_{2\omega} V_{ref} \sin \phi_{2\omega} \quad (4)$$

그림 3은 열식 유속센서의 원리를 나타내고 있다.⁵ 유동이 없을 경우(Reynolds number = 0) 히터에 의해서 발생한 열이 균일하게 확산되면서 열전쌍의 양 접점에 동일한 온도를 발생시키고, 따라서 동일한 전압신호를 생성한다.

하지만 유동이 있는 경우 상류 열전쌍(Upper thermopile)은 유체의 유동에 의한 강제대류의 영향을 받아서 온도가 저하되고, 하류 열전쌍(Lower thermopile)은 강제대류의 영향과 히터에 의해 가열된 공기 이동의 영향을 받아서 온도가 저하된다.⁶ 두 온도 프로파일의 차이는 채널 내부의 유속에 따라서 달라지게 되고, 상류와 하류 열전쌍의 출력을 비교하여 채널 내부에 흐르는 유체의 표면 유속을 알 수 있다.⁷

3. 측정결과 및 고찰

열식 유속센서의 출력에 관련된 parameter 중 히터의 발열량, 모듈레이션 주파수에 대한 실험을 하였고, 그 결과 그림 4 와 같은 그래프를 얻을 수 있었다. 조절밸브를 통해서 유속을 조절하면서 출력을 측정하였고, 0.1~0.6m/s 까지의 미소 유속의 범위에서 33.39 $\mu V/(m/s)$ 의 민감도(Sensitivity)와 선형성(Linearity)을 나타내었다. 하지만 일정유속이상에서는 하류 열전쌍의 온점점에서 가열된 공기의 이동효과가 오히려 감소하므로 냉점점과의 출력차이가 줄어들게 된다. 그 결과 그림 4 와 같이 0.6m/s 이상에서는 출력이 감소하는 경향을 나타내었다.

4. 결론

본 연구에서는 0.1~0.6m/s 의 유속에서 33.39 $\mu V/(m/s)$ 의 민감도를 가진 열식 유속센서를 개발하였고, 그 성능 특성을 살펴보았다. 유속 센서는 반도체 공정을 이용하여 형성된 박막위에 금과 니켈을 재료로 하여 열전쌍을 생성하였다. 미소신호의 검출을 위하여 30 쌍의 열전대와 전기회로를 구성하여 신호를 증폭하였고, 히터 모듈레이션을 통해서 잡음이 제거된 신호를 얻을 수 있는 기술을 제시 및 실험하였다.

후기

이 논문은 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단 국가지정연구실사업(No. ROA-2008-000-10065-0)의 지원과 광주과학기술원 생체적용나노기초기술연구센터의 지원으로 수행되었습니다.

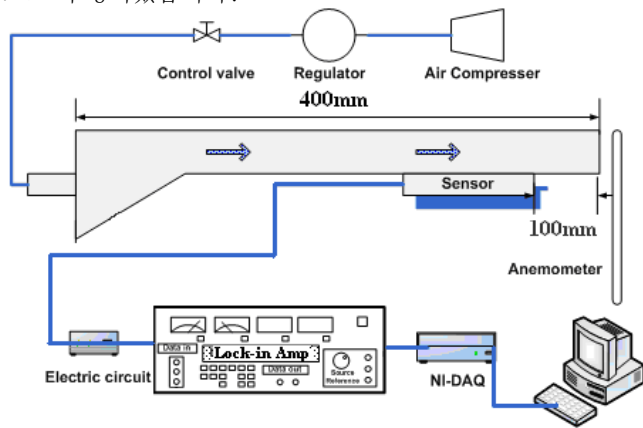


Fig. 1 Experimental setup for thermal velocity sensor

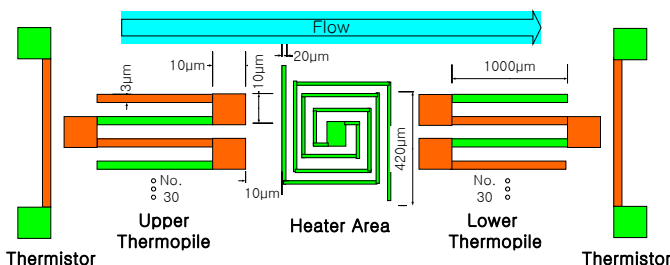


Fig. 2 Schematic diagram for front view of the sensor

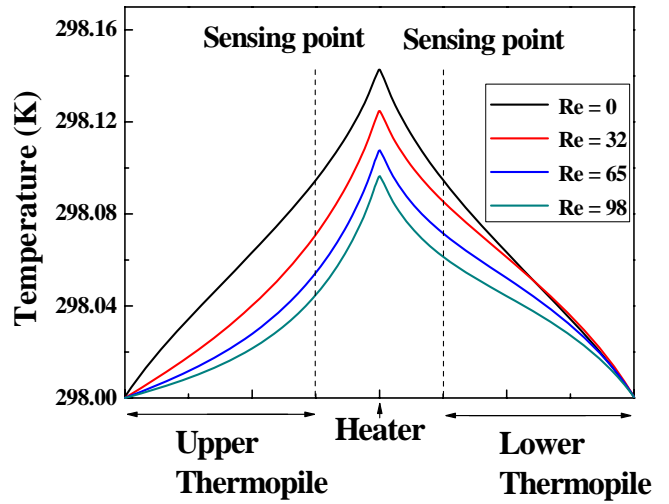


Fig. 3 Working principle of thermal mass flow velocity sensor

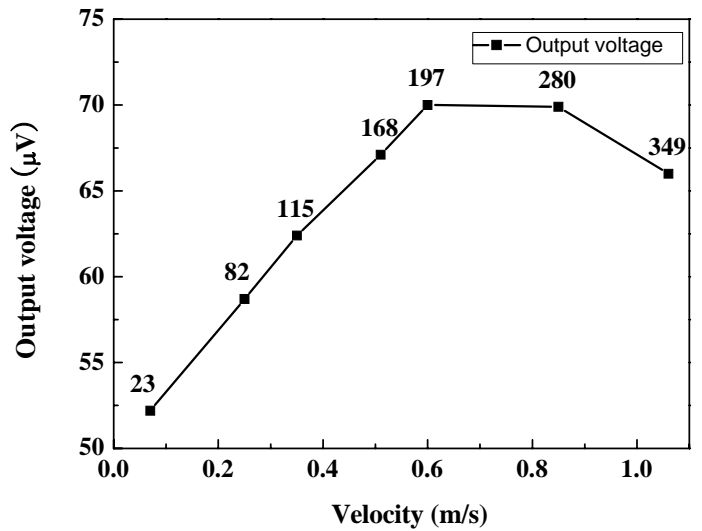


Fig. 4 Output voltage change with various Reynolds number

참고문헌

1. Nguyen, N.T, "Micromachined Flow Sensors - a Review", Flow Measurement and Instrumentation, Vol.8, No.1, pp7~16, (1997)
2. A.W. Van Herwaarden and P.M. Sarro, "Thermal sensors based on the Seebeck effect", Sensors and Actuators, 10(1986) 321-346
3. W.S. Chung, "Development of AC Thermal Anemometry", 대한기계학회논문집, 제 28 권, 제 2 호, pp.230~237, (2004)
4. F.P. Incropera, D.P. De Witt, "Fundamentals of Heat and Mass transfer", Wiley, Canada, (1990)
5. M. Elwenspoek, "Thermal flow micro sensors", IEEE (1999)
6. H.K. Jeon, "A numerical study for optimization of thermal mass air flow sensor", 대한기계학회, 추계학술대회 강연 및 논문초록집, pp97-102, (2006)
7. M. Ashauer, "Thermal flow sensor for liquids and gases based on combinations of two principles", Sensors and Actuators 73 (1999) 7-13