

미세 열유속 센서의 제작 및 보정

Fabrication and Calibration of Micro Heat Flux Sensor

전재철, 오석환, 김무환, 이승섭

포항공과대학교
경북 포항시 남구 효자동 산31

요약

높은 정확도를 가지는 미세 열유속 센서를 설계, 제작하고, 대류 조건하에서 보정 하였다. 보정 된 미세 열유속 센서는 $100 \sim 350 \text{ mW/cm}^2$ 범위의 열유속 조건에서 $0.1 \sim 1 \mu\text{V}/(\text{mW/cm}^2)$ 의 감도를 가진다. 작은 열유속 조건에서도 높은 정확도를 가지기 위해서 1953년 Gardon에 의해 제안된 circular foil gauge의 형태로 제작되었다. 미세 열유속 센서는 열유속의 경로와 온도계로 구성되어 있다. 바닥면을 통해서 센서로 들어간 열이 경로를 따라 흐르면서 열저항 양단에 온도차를 발생시키킨 후 대기중으로 방출된다. 이때 발생하는 온도차를 Ni-Cr 열전대로 측정하여 열유속을 얻을 수 있다.

Abstract

A high accuracy micro heat flux sensor has been designed, fabricated, and calibrated under convective environment. The calibrated sensitivity of the micro heat flux sensor is in the range of $0.1 \sim 1 \mu\text{V}/(\text{mW/cm}^2)$ under the heat flux condition of $100 \sim 350 \text{ mW/cm}^2$. To enhance the accuracy of the sensor in small heat flux condition, the geometry of the micro heat flux sensor is in the shape of the circular foil gauge which was suggested by Gardon in 1953. The micro heat flux sensor is composed of thermal path and thermometer. The heat flux from the wall enter to the bottom of the sensor, and drains out to the environment with producing temperature difference along its path. Heat flux can be obtained by measuring temperature with thermopile of nickel-chrome pair.

1. 서론

열유속 조건은 열전달 해석에 있어서 경계 조건으로 아주 중요한 역할을 한다. 이로 인해 열유

속을 측정하기 위한 방법에 대한 많은 연구들이 있어 왔다 [1]. 그 중에서도 열유속 센서를 이용하여 열유속을 측정하는 것은 간단하기 때문에 많이 이용되어 온 방법이다. 그러나, 열유속 센서를 이용하면 열유속 센서가 열 저항으로 작용하므로 열유속을 교란하게 되어, 원래의 열유속을 정확하게 측정하기가 어렵게 된다. 이러한 열유속 교란을 줄이면서 보다 정확한 열유속을 측정하기 위해 크기가 작은 열유속 센서가 개발되었다. 또 한편으로 충격파와 같이 고온, 고압에서 빠르게 일어나는 열전달의 양상을 알아보기 위해 응답 시간이 짧은 열유속 센서들의 연구도 진행되고 있다 [2,3,4,6].

열유속을 측정 방법에 따라 크게 세가지로 나눌 수 있다. 열저항 양단의 온도차를 이용하는 gradient method, 시간에 따른 온도변화를 이용하는 transient method, 가해진 열과의 균형을 이용한 energy balance method가 있다. 그 중에서 푸리에 전도 법칙(Fourier's conduction law)을 이용한 Layered gauge가 많이 쓰이고 있다. 이 방법으로 열저항 양단의 온도차를 측정하여 열유속을 측정한다. 그림 1은 layered gauge의 개략도를 보여준다.

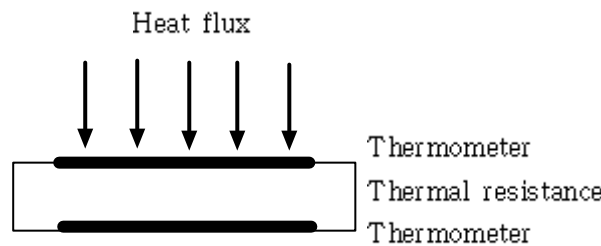


그림 1. Principle of layered gauge

Layered gauge에서 열 저항체의 두께가 두꺼워지면, 열 저항체 양단의 온도차가 커지게 되어 열유속 센서의 정확도는 높아지게 되지만, 응답시간이 길어지게 된다. 그러므로 Layered gauge에서 열 저항체의 두께는 매우 중요한 역할을 한다. 기존의 기계적인 가공 방법으로는 저항체의 두께가 약 1 mm이고, 열유속이 약 1 kW/m^2 인 조건에서 응답시간이 약 1초 정도인 열유속 센서를 제작할 수 있었다 [1]. 하지만, 반도체 공정 기술을 이용하면서 열 저항체의 두께를 매우 작게 할 수 있었고, 그에 따라 응답시간도 매우 짧아졌다. Hager 등은 열 저항체의 두께가 $1 \mu\text{m}$ 정도로 매우 얇고, 감도가 $0.594 \mu\text{V}/(\text{mW}/\text{cm}^2)$ 이며 응답시간이 $300 \mu\text{sec}$ 인 열유속 센서를 제작하였다.

많은 연구에 의해 응답시간을 단축시키는데는 결실을 거두었지만, 열 저항체의 두께가 얇아지면 열 저항체의 양단에 발생하는 온도차가 너무 작아지게 되어 낮은 열유속에서 정확도가 떨어지는 현상이 발생되었다. 이를 극복하기 위해 열전대열(thermopile)을 사용하였지만, 원래의 작은 온도차 때문에 발생하는 문제점을 극복하기에는 부족하였다.

1953년 Robert Gardon은 복사열유속을 측정하기 위한 circular foil gauge를 제안하였다 [5,7]. 그림 2는 Gardon gauge의 원리를 보여주고 있다. Gardon gauge는 얇고 둥근 콘스탄탄 원판과 구리 봉으로 이루어져 있다. 콘스탄탄 원판을 통해 흡수된 복사열이 콘스탄탄 원판의 중심에서 가장자리 방향으로 흘러 열침체물(heat sink) 역할을 하는 구리 봉을 만나게 되어 있다. 콘스탄탄 원판

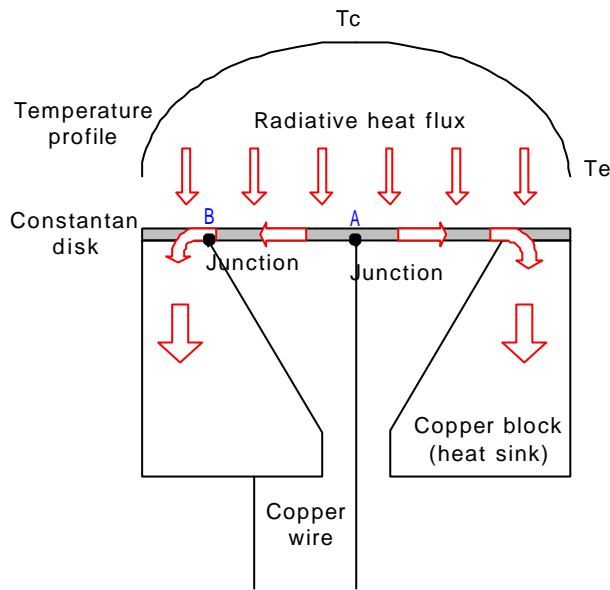


그림 2. Principle of Gardon's gauge

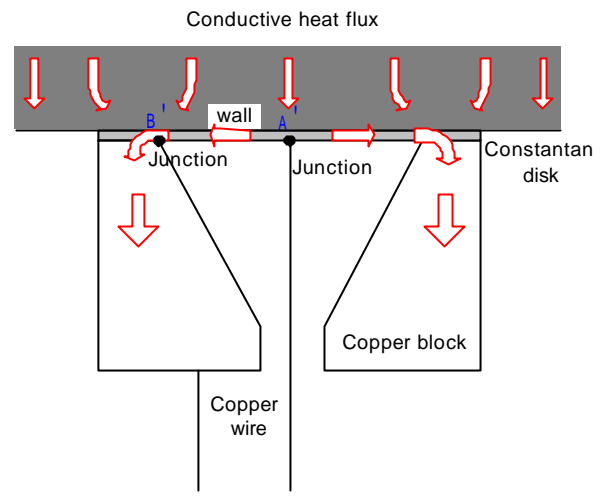


그림 3. Gardon's gauge for conductive heat flux

의 모서리와 중심에서의 접합점으로 열전대를 형성하여 온도차를 측정한다. 그림 3에서와 같이 그대로 벽면에서의 열유속 측정에 사용한다면 벽면에서의 열이 대부분 구리봉쪽으로 빠지게 된다. 이와같은 열유속 교란으로 인해 열유속을 정확하게 측정하기 어렵게 된다.

Gardon gauge의 기본 원리를 바탕으로 하면서 위에서와 같은 문제점을 극복할 수 있도록 MEMS 기술을 이용하여 작은 열유속 조건에서 높은 정확도를 가지는 미세 열유속 센서에 대해 연구하였다.

2. 원리(Principle)

Gardon gauge에서처럼, 열저항의 두께를 줄이고, 열 흐름의 방향을 벽면에 대해 수직한 방향에서 평행한 방향으로 바꾸으로써 기존의 열유속 센서에서 정확도가 떨어지거나 응답속도가 느린 문제점을 보완하였다.

그림 4는 미세 열유속 센서의 원리와 모양을 보여주고 있다. 벽면에서 나온 열유속은 벽면과 접촉하고 있는 미세 열유속 센서의 바닥 면을 통해 센서 안으로 들어간다. 센서로 들어간 열은 금박막을 따라 실리콘의 식각면을 지나 앞쪽으로 전달된 후 열전대 접합점을 차례로 통과한 후 외부로 배출된다 ($A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$). 이러한 과정에서 온도차가 발생되고 이 온도차($T_C - T_D$)로부터 열유속을 측정하게 된다. 이러한 미세 열유속 센서에서는 열저항의 온도차를 측정하는 C점과 D점 사이의 거리를 길게 하는 것이 용이하기 때문에, 두 점 사이의 온도차를 크게 하기가 쉽다. 그러므로 온도차로 발생하는 출력전압을 크게하여 정확도를 높일 수 있다.

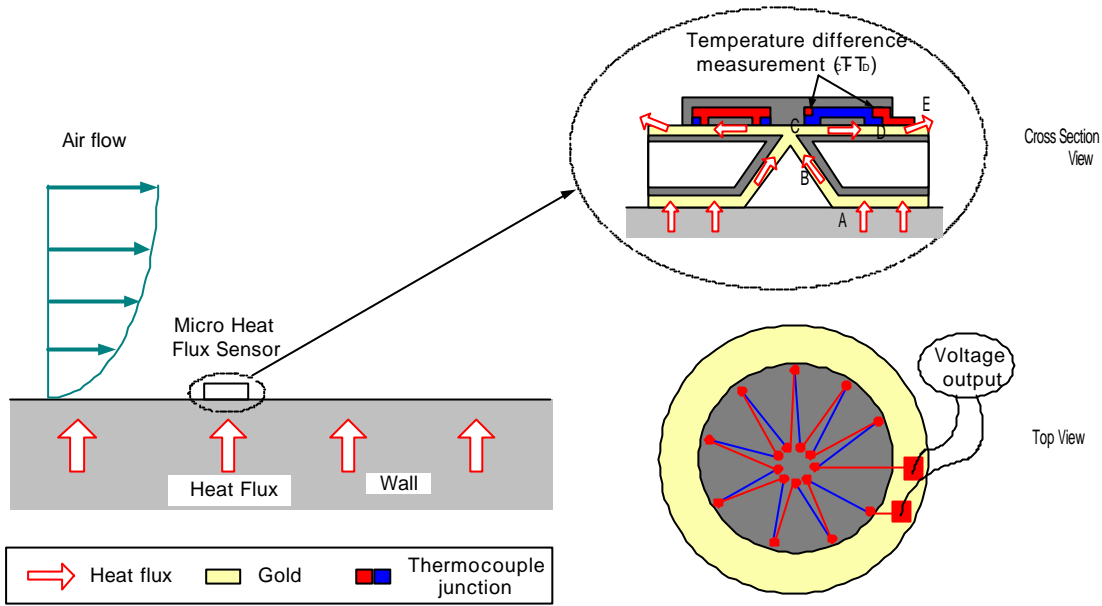


그림 4. Principle of the micro heat flux sensor

3. 제작(Fabrication)

그림5는 미세 열유속 센서의 제작과정을 보여준다. 미세 열유속 센서를 제작하기 위해서 $400\ \mu\text{m}$ 두께의 3-inch 실리콘 기판을 사용하였다. 먼저 TMAH 용액의 식각 마스크로 사용하기 위한 열산화막을 $0.6\ \mu\text{m}$ 성장시켰다. 다음으로 열이 아래쪽에서 위쪽으로 흘러갈 수 있도록 하기 위해 90°C TMAH 용액을 이용하여 실리콘 기판을 식각하였다. 금 박막을 통해서 흐르는 열의 손실을 막기 위한 단열층을 만들기 위해 다시 열산화막을 앞뒤에 모두 성장시켰다. 그 위에 $0.2\ \mu\text{m}$ 의 금을 증착하여 대부분의 열이 금 박막을 통해서 흐를 수 있도록 하였다. 열전대를 통해 온도를 측정하기 위해서는 열전대의 접합점이 금 박막의 중심과 바깥쪽에서 만나야 하고, 이들은 전기적으로 분리되어 있어야 한다. 이를 위해 PECVD를 이용하여 $0.2\ \mu\text{m}$ 의 산화막을 증착하였고, 열전대의 접합점을 만들기 위해 다시 산화막을 식각하였다. 이 산화막은 단열층의 역할도 하게된다. 그 다음으로 열전대로 사용되는 금속인 니켈과 크롬을 thermal evaporator를 이용하여 $0.2\ \mu\text{m}$ 증착하였다. 열전대의 접합점은 중심과 바깥쪽에 동심원의 형태로 만들어졌고, 큰 출력 신호를 얻기 위해 직렬로 연결한 열전대열(thermopile)의 형태로 제작하였다. (그림 4), 센서로 들어온 열이 금 박막을 통해 열전대의 두 접합점 사이를 지나는 동안 외부로의 열손실을 막기 위해 금 박막과 열전대 위쪽에 산화막을 다시 증착하였다. 마지막으로 wire bonding을 통해 출력신호를 측정할 수 있도록 하였다. 그림 6은 제작된 미세 열유속 센서이다.

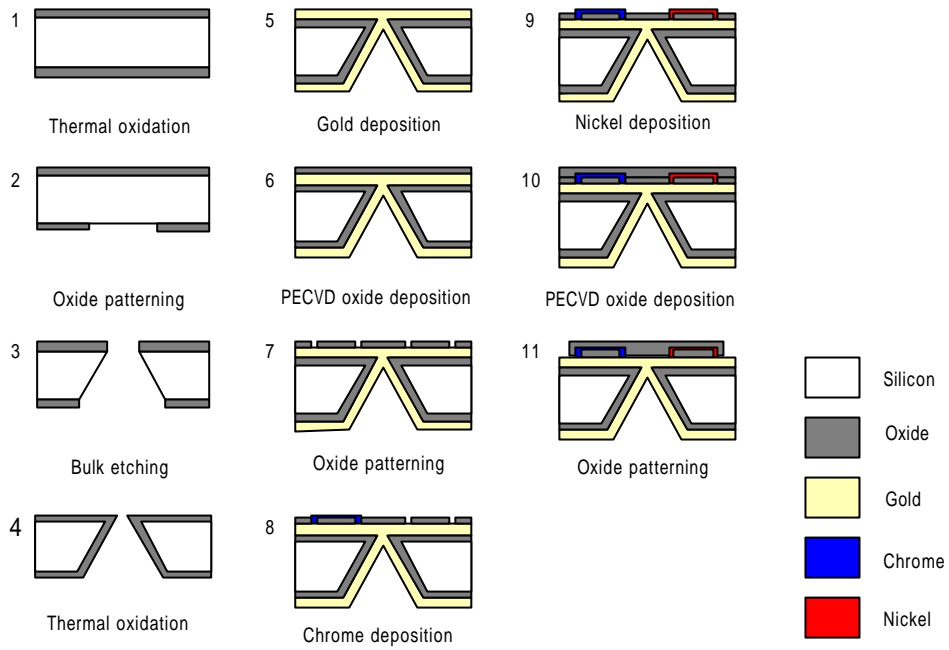


그림 5. Fabrication process of the micro heat flux sensor

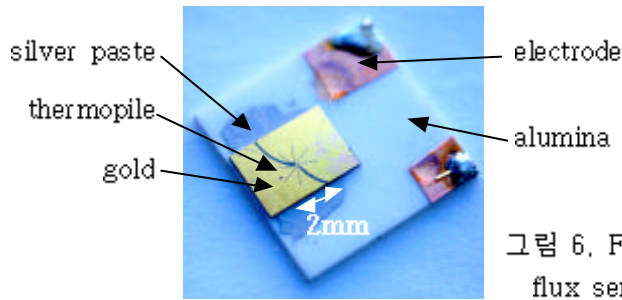
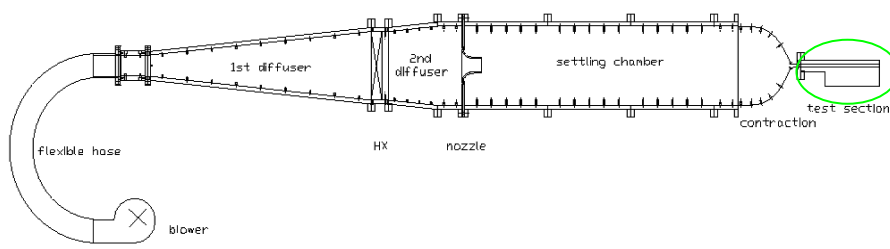
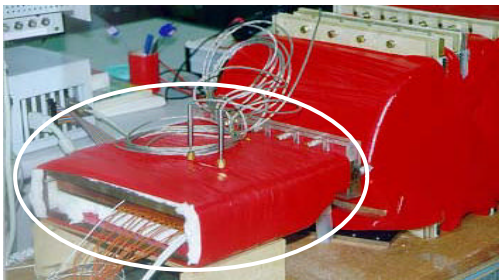


그림 6. Fabricated micro heat flux sensor



(a) Schematic diagram



(b) Test section

그림 7. Experimental facility - Small wind tunnel

4 보정 및 결과

4.1 보정(Calibration)

제작된 미세 열유속 센서를 사용하기 위해서, 먼저 보정이 필요하다. 지금까지 열유속 센서에 대한 많은 연구들이 있었지만 불행하게도 아직까지 제작된 열유속 센서를 보정하는 방법에 대해 표준화된 방법이 제시되지 못하고 있다.

제작된 미세 열유속 센서를 보정하기 위하여 Hølemberg 등이 제시한 소형 풍동에서 보정하였다. 일반적으로 대류에 의한 보정 방법을 많이 사용하고 있기 때문이다. 그림 7은 본 실험에 사용한 소형 풍동에 대한 개념도와 시험부를 나타낸 그림이다. 소형 풍동의 시험부에서는 아래쪽에서 전기 히터를 이용하여 구리판을 가열하고, 그 위를 소형 풍동에서 생성된 균일한 유동이 지나가면서 열을 빼앗아 가게 된다. 이러한 상황에서 미세 열유속 센서를 구리판 위에 놓고 보정을 하였다.

히터에서 구리판으로 열을 가할 때, 열손실을 없애기 위하여 히터의 아래쪽과 옆쪽을 잘 단열하였고, 구리판의 중심에 미세 열유속 센서를 위치시켰다. 대류 환경에서 열전달 양이 같더라도 열전달 계수에 따라 나타나는 측정값이 달라지므로, 열전달이 일어나는 표면에서의 열전달 계수가 가장 중요한 매개 변수이다. 누셀트 수(Nusselt number)는 열전달 계수의 형태를 가지는 무차원 수이고, 이는 프란틀 수(Prandtl number)와 레이놀즈 수(Reynolds number)의 함수이다. 본 연구에서 레이놀즈 수에 따른 열전달 계수를 살펴 보았다.

4.2 결과

그림 8은 미세 열유속 센서의 보정 결과를 보여주고 있다. 동일한 레이놀즈 수에서는 히터에 가해지는 열유속이 커질수록 센서로 유입되는 열량이 커져서 출력 신호가 커진다. 또한 열유속의 크기에 따라 출력 신호의 기울기, 즉 센서의 감도 차이를 보이고 있다. 하지만, 평균 미세 열유속 센서의 감도 ($0.1 \mu\text{V}/(\text{mW}/\text{cm}^2)$)는 기존의 여러 센서에 비하여 높은 값을 가지고 있다. (표 1.)

동일한 열유속 조건일 때, 높은 레이놀즈 수보다 낮은 레이놀즈 수에서 더 큰 출력신호(output signal)가 나오고 있음을 알 수 있다. 이는 레이놀즈 수가 낮을 때, 센서로 유입되는 열이 많다는 것을 나타낸다. 레이놀즈 수가 크면 히터에서 가해 준 열 중에서 센서로 유입되어서 유동으로 나가는 열보다 구리판에서 유동 속으로 바로 전달되는 열이 더 많기 때문이다.

미세 열유속 센서는 선형성에서 좋지 않은 결과를 보여주었다. 이것은 금 박막의 온도차를 측정하기 위하여 사용한 열전대의 물질이 좋은 선형성을 가지는 조합이 아니기 때문이다. 따라서 좋은 선형성을 가지는 열전대의 조합을 이용하면 미세 열유속 센서의 선형성의 문제를 극복할 수 있을 것이다.

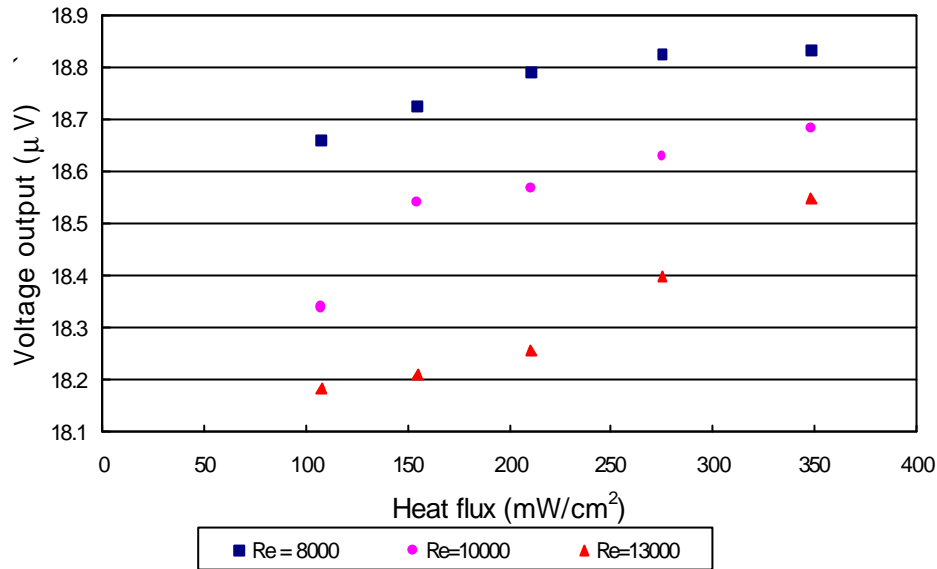


그림 8. Calibration results of micro heat flux sensor

표 1. Literature survey of the heat flux sensors

Authors	Type	Sensitivity $\mu V/(mW/cm^2)$	Thickness of the thermal resistance	Method of temperature measurement
Hager <i>et al.</i> (1991)	Layered gauge	0.594	Silicon monoxide	Thermopile (Copper/Constantan)
Epstein <i>et al.</i> (1986)	Layered gauge	-	Kapton sheet 25 μm	RTD (Nickel)
Hayashi <i>et al.</i> (1987)	Layered gauge	0.021	Silicon monoxide	RTD (Nickel)
Gardon (1953)	Circular foil gauge	0.00025	-	Thermocouple (Copper/Constantan)

5. 결론

본 연구에서는 이전에 있었던 열유속 센서의 문제점을 살펴보고, 이러한 문제점들을 극복할 수 있는 미세 열유속 센서를 설계 및 제작, 보정하였다. 미세 열유속 센서는 열이 흘러가는 방향을 바꾸어줌으로써, 기존의 센서가 박막을 열저항체로 사용할 때, 낮은 열유속에서 정확도가 떨어지는 문제점을 보완하였다.

미세 열유속 센서는 낮은 열유속에서 기존의 센서에 비해 높은 감도를 가지고 있다. 미세 열유속 센서는 $100 \sim 350 mW/cm^2$ 의 열유속에서 $0.1 \sim 1 \mu V/(mW/cm^2)$ 의 감도를 가진다.

그렇지만 좋은 선형성은 보이지 않는다. 열전대 물질로 니켈-크롬을 사용하였는데 이들이 좋은

선형성을 가지는 조합이 아니기 때문이다. 선형성을 가지는 열전대 조합을 사용함으로써 이를 개선할 수 있을 것이다. 또한 다른 열전대 조합을 사용함으로써 센서의 감도도 높일 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] T. E. Diller, "Advances in heat flux measurements", *Advances in Heat Transfer*, Vol. 23, pp. 279-368, 1993
- [2] M. Hayashi, A. Sakurai, S. Aso, "A study of a multi-layered thin film heat transfer gauge and a new method of measuring heat transfer rate with it", *Jpn. Soc. Aeronaut. Space Sci. Trans.*, Vol. 30, pp. 91-101, 1987
- [3] A. H. Epstein, G.R. Guenette, R.J.G. Norton, and Y. Cao, "High-frequency response heat-flux gauge", *The Review Scientific Instruments*, Vol. 57, pp. 639-649, 1986
- [4] J. M. Hager, S. Simmons, D. Smith, S. Onishi, L.W. Langley, and T.E. Diller, "Experimental performance of a heat flux microsensor", *ASME J. Eng. Gas Turbines Power*, Vol. 113, pp. 246-250, 1991
- [5] Robert Gardon, "A transducer for the measurement of heat flow rate", *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 82, pp. 396-398, 1960
- [6] J.M. Hager, S. Onishi, L.W. Langley, T.E. Diller, "Heat flux microsensors", In *transfer measurements, analysis and flow visualization* (R.K. Shah), pp. 1-8, ASME, New York, 1989
- [7] Robert Gardon, "An instrument for the direct measurement of Intense thermal radiation", *The Review of Scientific Instruments*, Vol. 24(5), 1953
- [8] D. Holemborg, K. Steckler, C. Womeldorf, and W. Grosshandler, "Facility for calibrating heat flux sensors in a convective environment", *Proc. ASME Heat Transfer Div.*, Vol. 3, pp. 165-171, ASME, 1997