

## 구리 도금층을 이용한 미세 열유속 센서

오석환\*, 전재철\*, 김무환\*, 이승섭\*

## The Micro Heat Flux Sensor using Electroplated Copper layers

Seokhwan Oh\*, Jaechul Jeon\*, Moohwan Kim\*, and Seung S. Lee\*

## ABSTRACT

New types of the micro heat flux sensor are designed and fabricated using SU-8 and Cu electroplating. And then calibrated under convection environment. The thermal path was made by SU-8 structure and electroplated Cu layers. The bottom surface of the micro heat flux sensor receives the heat flux from the wall, Then the heat flows along the Cu layers and drains out to the environment with producing the temperature difference at the upper layer of Cu. By measuring this temperature difference, the heat flux from the wall can be obtained. The temperature difference is measured by thermopile which is composed of Ni-Cr pairs or Al-chromel pairs. The calibration is accomplished under convection environment because it is most frequent situation. The range of the sensitivity is  $0.11 \sim 2.02 \mu V / (mW/cm^2)$  for the various heat flux and Reynolds numbers.

**Key Words** : Heat flux sensor (열유속 센서), SU-8, Copper electroplating (구리 전기도금)

## 1. 서론

열유속은 열전달 문제에서 경계조건으로 온도와 함께 중요한 요소 중의 하나이다. 이런 이유로 지금까지 많은 연구들이 이루어졌고, 최근에는 MEMS 기술을 이용한 센서도 많이 개발되고 있다<sup>[1-4]</sup>. MEMS 기술을 이용하는 경우, 센서의 크기를 가능한 작게 만들 수 있으며, 이는 열유속 측정 시, 센서로 인해 생기는 열유속의 교란을 최소화시키는 데 매우 유리한 환경을 제공하게 된다.

열유속을 측정하는 방법은 크게 세 가지로 나눌 수 있다<sup>[1]</sup>. 열저항 양단의 온도차를 이용하는 gradient method, 한 점에서의 시간에 따른 온도 변화를 이용하는 transient method, 가해준 에너지와의 균형을 이용한 balanced method 이다.

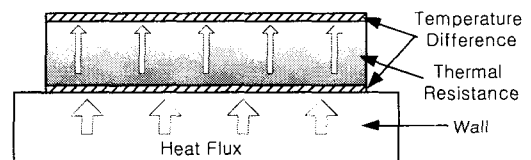


Fig. 1 Principle of layered gauge

벽면에서의 열유속을 측정하는 방법은 대부분 gradient method 의 layered gauge 형태이다. Fig. 1 은 layered gauge 의 원리를 개략적으로 나타낸 그림이다<sup>[1, 4]</sup>. Layered gauge 에서 열저항층의 두께가 두꺼워지면 열저항 양단의 온도차가 커지므로 정확도가 높아지지만, 응답 속도가 느려지는 단점이

\* 포항공과대학교 기계공학과

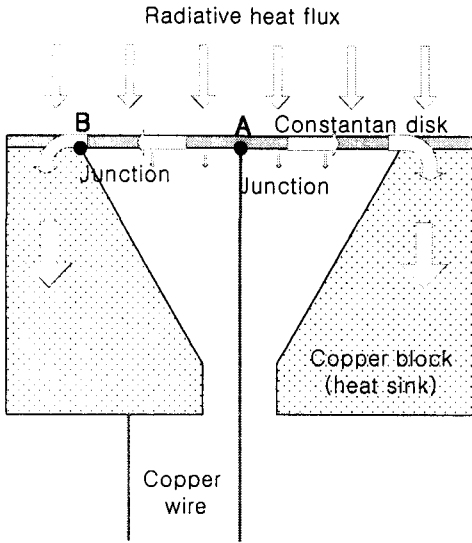


Fig. 2 Principle of circular foil gauge

있다.

Gradient method 의 다른 형태인 circular foil gauge 에서는 온도차가 열유속에 대해 수직인 방향으로 생성된다 (Fig. 2). 이것은 얇은 박막을 통해 열을 흡수하여 중심과 가장자리의 온도차로부터 열유속을 측정하는 것이다. 하지만 이는 감도가 너무 낮은 단점이 있다. Circular foil gauge 는 복사 열유속을 측정하기 위해 제안되었다<sup>[1]</sup>. 이를 그대로 벽면 열유속을 측정하기 위해 적용한다면 열유속에 대한 교란이 커지게 된다. 이를 극복하기 위해 구조를 개선하고 MEMS 기술을 이용한 미세 열유속 센서가 개발되었다.

Fig. 3 은 미세 열유속 센서의 원리이다. 아래쪽에서 흡수한 열은 금 박막을 따라 실리콘 식각면을 지나 위쪽으로 전달되고, 다시 외부로 빠져나갈 수 있다. (A → B → C → D → E) 이때 위쪽 금박막에서의 온도차를 측정하여 열유속을 알 수 있다. 하지만 이것은 실리콘 습식 식각을 이용하기 때문에 중심부가 사각형 모양이고, 이로 인해 중심부의 열전대 접점에서의 온도가 균일하지 않을 수 있다. 또한 식각면은 54.74° 의 각을 가지므로 아주 미세한 센서를 제작하는데 한계가 있을 수 있다. 그리고 단열층으로는 SiO<sub>2</sub> 를 이용하였는데, 이는 너무 얇기 때문에(약 1 μm) 많은 열이 실리콘면을 통해서 전달된다.

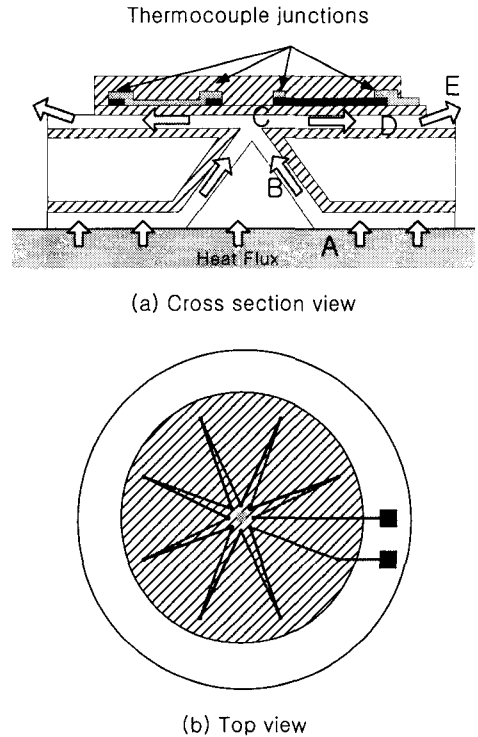


Fig. 3 Schematic view of the previous micro heat flux sensor

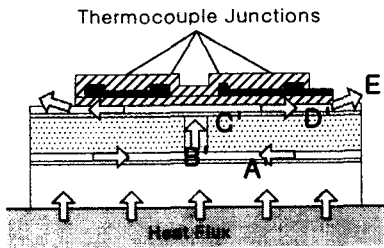
이러한 단점을 극복하기 위해 SU-8 을 구조물과 단열층으로 사용하고, 구리 도금층을 이용하여 열이 원하는 경로를 따라 더 잘 흐르도록 하였다.

## 2. 설계 및 원리

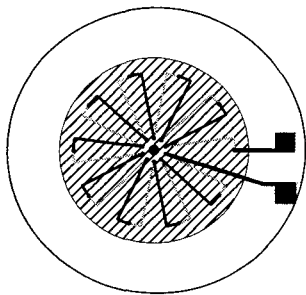
Fig. 4 는 새로운 미세 열유속 센서의 원리를 나타낸 것이다. 이는 이전의 미세 열유속 센서의 원리와 거의 같다<sup>[2]</sup>. 아래 실리콘을 통해서 들어온 열은 구리층을 따라 위쪽 중심으로 전달되고, 다시 가장자리를 통해 외부로 빠져나간다. 앞서 기

Table 1 Composition and operation condition of copper sulfate bath

Copper sulfate solution	800 ml/l
Brightener	4 ml/l
Temperature	Room temperature
Anode	Cu plate contains 0.03~0.07% Phosphorus
Cathode current density	50 mA/cm <sup>2</sup>



(a) Cross section view



(b) Top view

Fig. 4 Schematic view of the new micro heat flux sensor

술한 바와 같이 열이 흐르는 경로는 구리 도금층을 이용하여 두겹게 함으로써 열저항을 줄였다. 또한 다른 곳을 통해 전달되는 열을 줄이기 위해 열전도도가  $0.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  정도로 매우 작은 SU-8을 이용하여 구조물을 만들었다.

Fig. 3(b)와 Fig. 4(b)에서 알 수 있듯이 열전대의 형태는 별 모양에서 꽃잎 모양으로 바꾸었다. Fig.3(b)와 같은 형태일 경우 정렬이 정확히 이루어지지 않으면 바깥쪽 접점이 원하는 것보다 중심에 가까운 곳에서 형성될 수 있다. 그러면 원하는 값보다 작은 온도차를 읽게 되어 센서의 성능을 떨어뜨리게 된다. 또한 센서들간의 재현성이 떨어지게 되는 단점이 있다. 이를 개선하기 위해 바깥쪽에서는 원형으로 구부러지도록 하여, 정확한 정렬이 이루어지지 않더라도 그 접점의 위치는 거의 같도록 하였다.

### 3. 제작 공정

Fig 5는 새로운 미세 열유속 센서의 제작 공정을 나타낸 것이다. 먼저 도금을 위한 seed layer로 금박막을  $0.1 \mu\text{m}$  증착한 다음, 구리를  $10 \mu\text{m}$  도금한

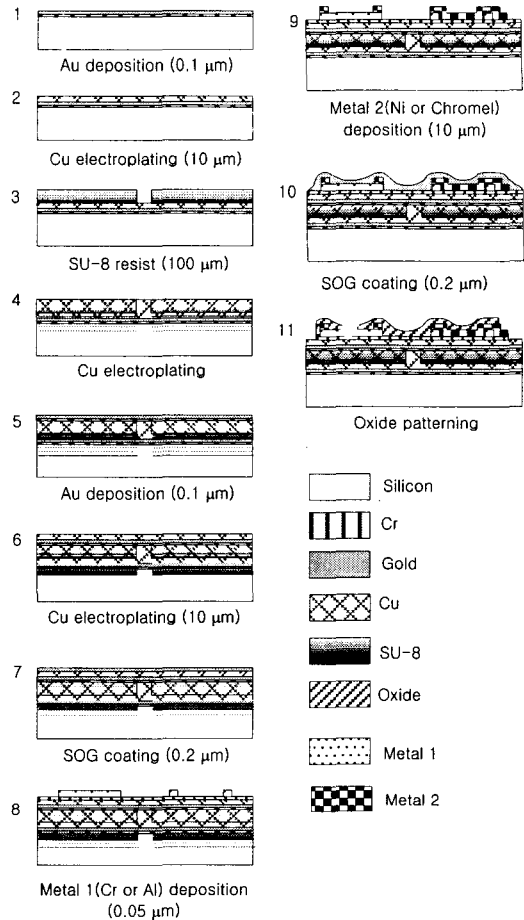


Fig. 5 Fabrication process of the micro heat flux sensor

다. 도금 조건은 Table 1 과 같다. 단열층을 만들기 위해 SU-8(negative P.R. : EPON SU-8, Micro Chemical. Co.)을 이용하여  $100 \mu\text{m}$  두께의 pattern을 형성한다. 다시 구리를 도금하여 열이 중심을 통해 위쪽으로 전달되는 통로를 만들어준다. 다시 seed layer인 금박막을  $0.1 \mu\text{m}$  증착하고 그 위에  $10 \mu\text{m}$  두께로 구리를 도금한다. 절연을 위해서 Spin-On Glass(SOG)를 spin coating으로 입히고  $200^\circ\text{C}$ 에서 2시간 curing 한다. Spin coating 조건은  $2000 \text{ rpm}$ 으로 20초간 실행하여,  $0.2 \mu\text{m}$ 의 두께를 얻었다. 다음으로 열전대 금속을 차레대로  $500 \text{ \AA}$  증착한다. 본 연구에서는 Ni-Cr 쌍과 Al-chromel 쌍을 열전대 금속으로 하였다. 도금된 구리층을 통해 열전대의 두 접점을 지나는 동안 외부로의 열손실을 줄이기 위해 금 박막과 열전대 위쪽에 다시 SOG

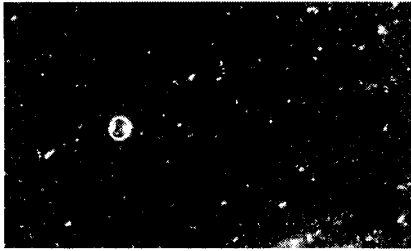


Fig. 6 Top view of fabricated micro heat flux

를 입고, 접점 외부는 식각한다. Fig. 6 은 제작 완성된 미세 열유속 센서의 평면도를 보여주고있다. 가운데 Cu 도금층으로 형성된 중심축과 꽃잎 모양의 열전대 형상이 선명하게 보인다.

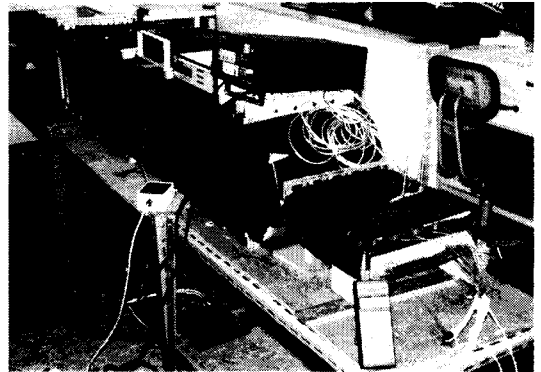
#### 4. 보정 실험

Fig. 7 의 소형 풍동을 이용하여 대류 환경에서 보정 실험을 하였다. 대류 환경은 열유속 측정에서 가장 일반적인 상황이기 때문이다. 보정을 위한 시험부에서 센서 주위의 열유속은 균일해야 하므로 열전도도가 높은 구리판을 이용하였고, 열손실을 막기 위해서 시험부 주위는 유리섬유로 단열시켰다.

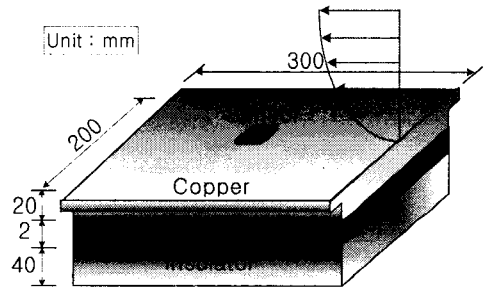
그러나 열유속 센서 자체로 인한 열유속의 교란은 피할 수 없는 오차를 제공하였으며, 이는 향후 센서를 크기를 최소화하거나, 가능한 센서의 열특성을 측정하고자 하는 벽면의 열특성과 가깝게하도록 하는 연구가 필요하리라 믿어진다. 혹은 센서로 인한 열유속 교란 현상에 대한 수치해석 연구도 가능한 시도로 고려되고있다.

대류 환경에서 중요한 변수는 열유속과 열전달이 일어나는 표면에서의 열전달 계수이다. 그 이유는 열전달 양이 같더라도 열전달 계수에 따라 열저항이 달라지므로 센서에서의 출력 전압도 달라지기 때문이다. 이때 무차원수인 Nusselt number 를 이용하여 다른 변수들까지 포함한 영향을 알아볼 수 있다. Nusselt number 는 Prandtl number 와 Reynolds number 의 함수로 나타낼 수 있는데, Prandtl number 는 공기중에서 거의 일정하므로 Reynolds number 와의 관계로부터 열전달 계수와와의 관계를 알 수 있다.

풍동에서 나오는 바람의 온도를 일정하게 유지하기 위해 항온조가 연결되어 있으나, 항온조를



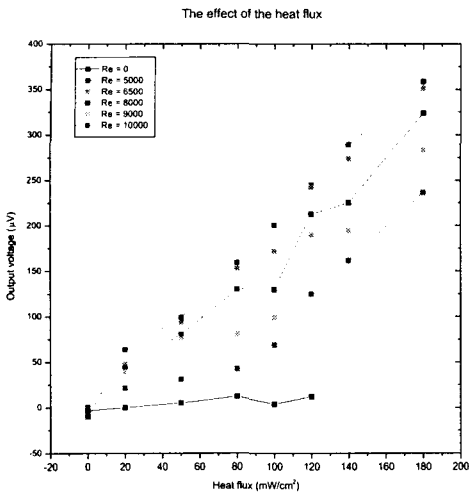
(a) Small wind tunnel



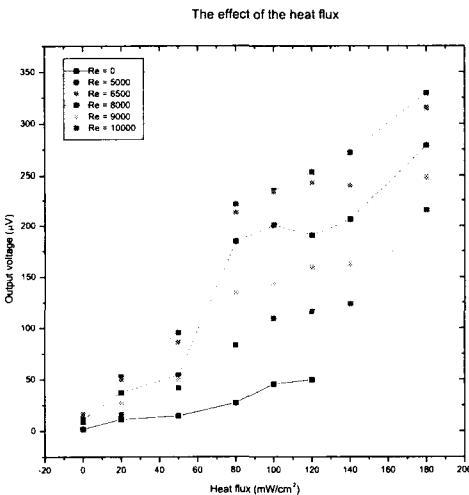
(b) Schematic view of the test section

Fig. 7 Calibration facility

작동하지 않더라도 내부 공기의 온도는 19.5 ~ 20 °C 정도로 유지된다. 실제 센서가 놓여있는 시험부에서의 온도는 chamber 를 통해서 나오는 공기의 온도보다 아래쪽 가열판에 의한 온도 변화에 훨씬 많은 영향을 받기 때문에, 항온조를 이용한 공기의 온도 조절은 필요없었다. Reynold number 는 시험부 단면의 수력지름을 characteristic length 로 계산하였으며, 노즐 양단의 유속을 측정하여 유량을 계산하였다. 유속은 노즐에서의 압력차로 측정할 수 있었으며, 본 연구에서는 0, 2, 4, 6, 8, 10 mmH<sub>2</sub>O 의 경우에 대해서 실험하였다. 제작된 센서를 copper tape 을 이용하여 시험부의 구리판에 부착하고, 측정하고자하는 열유속과 Reynold number 을 조절한 다음, 유동이 정상상태가 될 때까지 기다리며, 이 때의 출력 전압을 digital multimeter (Keithley 195A)로 측정하였다.



(a) Ni-Cr pair



(b) Al-Chromel pair

Fig. 8 Calibration result of the micro heat flux sensor

### 5. 결과 및 토의

Fig. 8은 보정 결과이다. 센서의 감도는 약  $0.11 \sim 2.02 \mu V/(mW/cm^2)$  정도이다. 이는 이전의 미세 열유속 센서와 비슷한 값이다. 이것은 금박막을 통해서 전달되는 열보다 구리층을 통해 전달되는

열이 더 많지만, 위쪽 구리층에서의 열저항이 너무 작아 상대적으로 열전대 접점 사이의 온도차가 작기 때문에 더 높은 감도를 보이지 않는 것이다.

동일한 열유속 조건일 때, Reynolds number가 증가함에 따라 출력 전압은 작아지는데, 이것은 센서가 위치한 곳과 그렇지 않은 곳의 열저항 차이로 인해 발생하는 것으로 생각된다. Reynolds number가 커지면 열전달 계수가 커지므로 구리 표면에서의 열저항이 줄어들지만, 센서의 열저항은 그대로이기 때문에, 상대적으로 센서로 유입되는 열보다 외부로 전달되는 열이 많아지기 때문이다. Reynolds number가 0일 경우에는 열유속 증가에 따라 출력 전압의 변화가 거의 없다. 이는 많은 열이 시험부 내에 갇혀 있기 때문에 실제로 구리판에서 외부로 방출되는 열유속이 거의 존재하지 않기 때문일 것이다. 이러한 자연 대류에 관해서는 더 연구되어야 할 것이다.

열전대는 Ni-Cr 쌍과 Al-Chromel 쌍을 이용하였다. 감도는 Al-Chromel 쌍이  $0.40 \sim 2.02 \mu V/(mW/cm^2)$  정도로 Ni-Cr 쌍의  $0.11 \sim 1.99 \mu V/(mW/cm^2)$ 보다 약간 더 높게 나타났다. 선형성 측면에서는 Ni-Cr 쌍이 좀 더 우수함을 알 수 있다. 또한 이러한 형태의 미세 열유속 센서의 선형성은 열전대 쌍보다는 구조에 더 많은 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

### 6. 결론

본 연구에서는 이전의 미세 열유속 센서가 가지는 단점을 극복할 수 있는 센서를 개발하고자 하였다. 열이 흐르는 경로의 저항을 줄이고 단열층의 열저항을 증가시킴으로써 감도를 높이고자 하였다. 하지만 온도차를 측정하는 구리층의 열저항이 너무 작기 때문에 실제 감도는 비슷한 정도에 머물렀다. 온도차를 측정하는 부분에서의 열저항을 크게 함으로써 더 큰 출력 전압과 감도를 가질 수 있을 것이다.

새로운 열유속 센서의 감도는  $0.11 \sim 2.02 \mu V/(mW/cm^2)$ 이고, 이러한 구조에서 열전대 조합은 Al-chromel 쌍보다는 Ni-Cr 쌍이 선형성 면에서 더 유리하다. 온도차 측정부의 열저항을 크게 함으로써 감도를 크게 할 수 있다. 이를 위해 구리 도금을 하지 않거나 얇게 해야 할 것이다.

### 참고문헌

1. T. E. Diller, "Advances in Heat Flux Measurements," Advances in Heat Transfer, Vol. 23, pp. 279-368, 1993.
2. Jaechul Chun, S. Hwan Oh, Seung S. Lee, and Moohwan Kim, "Design and Fabrication of a Micro Heat Flux Sensor," Proceedings of Transducers'99, pp. 414-417, 1999.
3. M. Hayashi, A. Sakrai, and 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.
4. J. M. Hager, S. Simmons, D. Smith, S. Onishi, L. W. Langley, T. E. Diller, "Experimental performance of a heat flux micro sensor," ASME J. Eng. Gas Turbines Power, Vol. 113, pp. 246-250, 1991.
5. Gardon Robert, "An instrument for the direct measurement of intense thermal radiation," The review of scientific instruments, Vol. 24(5), 1953.