

MEMS 를 이용한 미세 열유속센서의 개발

양훈철[†] · 송철화^{*} · 김무환^{**}

Development of Micro-machined Heat Flux Sensor by using MEMS technology

Hooncheul Yang, Chul Hwa Song and Moo Hwan Kim

Key Words : Heat Flux Sensor(열유속센서), MEMS(미세기전공학), Layered Type(층상형), Convection(대류), Calibration(검정), Sensitivity(민감도)

Abstract

New method for the design, fabrication, and calibration of micro-machined heat flux sensor has been developed. Two types of micro-machined heat flux sensor having different thicknesses of the thermal-resistance layer are fabricated using the MEMS technique. Photo-resist patterning using a chrome mask, bulk-etching and copper-nickel sputtering using a shadow mask are applied to make heat flux sensors, which are calibrated in the convection-type heat flux calibration facility. The sensitivity of the device varies with thermal-resistance layer, and hence can be used to measure the heat flux in heat-transfer phenomena.

기호설명

A	: 센서의 면적	[m ²]
emf	: 열기전력	[mV]
k	: 열전도도	[W/m.K]
q	: 열이동량	[W]
q"	: 열유속	[W/m ²]
S	: 민감도	[mV/W/m ²]
T	: 온도	[K]
ΔT	: 온도차	[K]
Δx	: 열저항의 두께	[m]

하첨자

air	: 공기
comm:	상용 열유속센서
MHFS:	미세 열유속센서
w	: 벽면조건

[†] 회원, 포항공과대학교 대학원 기계공학과,
한국에너지기술연구원 건물에너지연구센터
E-mail : yang@kier.re.kr
TEL : (042)860-3214 FAX : (042)860-3202

^{*} 한국원자력연구소 열수력 안전연구팀

^{**} 회원, 포항공과대학교 기계공학과

1. 서론

열전달 메커니즘에 대한 규명을 위해 다수의 연구자들은 열전달량 측정과 관련된 많은 연구를 수행하여 왔다. 열전달량 측정의 대표적인 방법으로 열유속 측정이 있다. 일반적으로 열유속은 일정간격을 가진 두 개 이상의 지점의 온도를 열전대 등을 이용하여 측정하고 이를 열전도 방정식 혹은 역 열전도(inverse heat conduction) 방정식 등의 방법을 통해 간접적으로 계산할 수 있다. 열유속을 직접적으로 측정하기 위해서는 열유속센서(heat flux sensor)와 같은 계측용 센서를 사용해야 한다.

열유속센서는 열전달량에 비례하는 열기전력 신호를 측정하여 알려진 민감도(sensitivity)에 대한 관계식을 통해 열유속을 바로 계산할 수 있는 매우 효과적인 계측 장비이다. 기존의 열유속센서에서 층상형 열유속센서(layered type heat flux sensor)는 대표적인 열유속 측정장비이다.

층상형 열유속센서는 Kapton 과 같은 500~1,000 μm 두께의 열저항 물질로 이루어진 박막 내부에 두 개의 서로 다른 금속으로 이루어진 서모파일

(thermopile)이 존재하는 구조를 갖는다. 이 센서는 열전달 현상이 있는 표면에 부착되어 센서내부의 서모파일에 형성되는 온도차에 비례하는 열기전력(thermo electromotive force)을 측정하여 열유속을 계산한다.

Diller⁽¹⁾는 열유속 측정과 관련된 다양한 측정방법과 검정방법에 대해 연구하고 1990년대 초반까지의 자료를 집대성하였다.

Hayashi et al.⁽²⁾는 Silicon monoxide를 열저항층으로 이용하고 열저항층의 양쪽에 진공증착법으로 니켈을 이용한 측온저항체(RTD)를 형성하여 $2.1 \mu V/(kW/m^2)$ 의 민감도와 600 Hz의 응답주파수를 갖는 열유속센서를 제작하였다.

Epstein et al.⁽³⁾은 25 μm 의 열저항층을 갖고 니켈을 이용한 측온저항체를 온도센서로 이용하여 열유속센서를 제작하였으며 100 kHz의 응답주파수를 얻었다.

Hager et al.^(4,5)은 1 μm 의 Silicon monoxide 열저항층과 서모파일을 이용하여 열유속센서를 제작하고 $0.594 \mu V/(kW/m^2)$ 의 민감도와 300 μsec 의 응답시간을 얻었다.

전재철^(6,7)은 낮은 열유속에서 높은 민감도를 가지기 위하여 열유속센서의 형상 설계 시 Gardon^(8,9)이 제작한 원형박막 열유속센서(circular foil gauge) 형상을 채택하였다. 이는 원형 박막의 2점에서 발생하는 온도차를 서모파일로 측정하여 열유속을 측정하였다. 흡열부와 원형 박막은 금으로 제작되었고 서모파일은 니켈과 크롬의 쌍으로 제작하였다.

오석환⁽¹⁰⁾은 단열성능이 우수한 폴리머인 SU-8을 단열층으로 사용하여 열유속센서를 제작하였으며 이는 전재철의 연구에서 사용한 금 박막 대신 구리를 두껍게 도금하여 많은 양의 열이 구리층을 흐르도록 하였다.

기존의 미세 열유속센서는 평판상에 얇은 열저항층을 형성한 후 그 표면에 서모파일을 형성하게 된다. 이 경우 열저항층상에 부착되는 금속의 이탈현상으로 인해 서모파일 형성이 곤란하다. 본 연구는 미세기전공학(Micro Electro-Mechanical System; MEMS)과 미세기계가공을 이용하여 열저항층의 두께에 관계없이 균일 표면에 서모파일을 구성하는 새로운 온도차 측정법을 구현하며 가변적 열저항 구조물 형성이 용이한 층상형 열유속센서를 개발하였다. 또한 새롭게 개발된 대류형 열유속 검정장치(convection type heat flux calibration facility)에서 미세 열유속센서를 검정하였다.

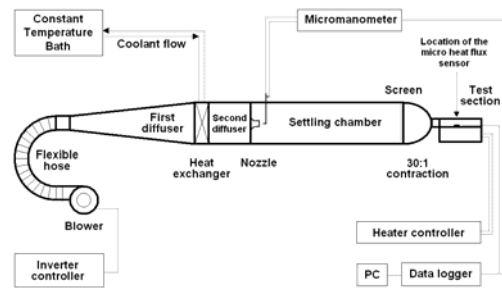


Fig. 1 Schematic diagram of the test facility

2. 대류형 열유속 검정장치

2.1 검정장치의 제작

열유속센서는 기지의 열유속을 발생하는 검정장치에서 검정하여야 한다. 이를 위하여 주시험부에 균일한 평판유동을 발생시킬 수 있는 대류형 열유속 검정장치를 개발⁽¹¹⁾하였으며 이는 Fig.1과 같이 저속 개방형 소형풍동으로 설계 및 제작하였다.

소형풍동의 수축부는 Holmberg et al.^(12,13)의 관계식을 이용하여 제작하였으며 주시험부에서는 레이놀즈 수가 0~40,000인 층류유동이 형성된다. 주시험부는 5 mm 두께를 갖는 12개의 서로 다른 크기의 동판을 에폭시로 접착하여 형성하였다. 각 동판하부에 부착된 박막히터에 공급되는 전력을 측정하기 위하여 히터공급선 양단의 전류와 전압 신호를 측정하였다. 전압과 전류의 신호로부터 노이즈를 제거한 후 곱셈 회로를 이용하여 오실로스코프(Tektronix, TDS3034)에 연결하면 입력 전력에 해당하는 전압신호가 얻어진다. 히터에 공급되는 전력값은 데이터 수집용 프로그램(Wavestar, Tektronix)을 이용하여 평균값을 측정하였다. 열유속센서에서 출력되는 열기전력 신호, 온도 신호와 노즐부의 속도신호 및 주변온도 측정은 20 Hz의 데이터 수집장치(Agilent, 34970A)를 사용하여 측정한다.

2.2 검정장치의 불확실성

검정장치의 불확실성 분석⁽¹¹⁾은 대류형 검정장치의 불확실성과 열유속 측정 시의 불확실성 및 히터에 공급되는 전력 측정시의 불확실성으로 구분된다.

대류형 검정장치의 불확실성은 동판의 측면방향·수직방향으로의 전도에 의한 불확실성과 복사 의한 불확실성이 대표적이다. 열유속 측정 시의 불확실성은 동판상에서 센서부착 부분의 열유속 분포의 불확실성이 대표적이다. 또한 히터전력 측

Table 1 Experimental uncertainties

condition	uncertainty
Lateral conduction	0.23 %
Vertical conduction	0.23 %
Radiation	0.10 %
Heat flux distribution	1.51 %

정시의 불확실성은 사용한 저항의 오차와 전류 및 전압 측정 시 계측기의 오차 때문에 나타난다. 각 불확실성에 대한 값은 Table 1에 정리되어 있다.

3. 미세열유속센서 제작

3.1 열유속센서의 디자인

현재 상용 열유속센서는 Fig.2(a)와 같은 구조를 가지며 Kapton 내에 존재하는 서모파일 상·하간의 접점에서 온도차에 비례하는 열기전력을 측정하는 원리를 이용한다.

미세기전공학을 이용하여 미세구조의 열유속센서를 제작하려면 실리콘 웨이퍼와 같은 기판상에 서모파일을 형성해야 한다. 하지만 공정의 특성상 Fig.2(a)와 같은 형상을 형성하는 것은 용이하지 않다. 이에 따라 기존의 미세 열유속센서는 기판상에 열저항 물질을 도포하거나 쌓아 올린 후 열저항 물질과 기판상에 서모파일을 형성하는 방법을 주로 사용하였다.

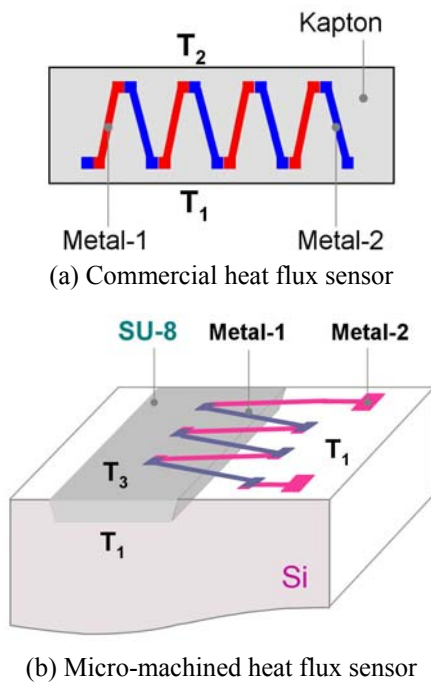


Fig. 2 Schematic diagram of heat flux sensor

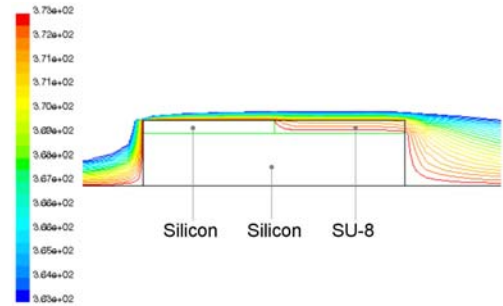


Fig. 3 Heat transfer simulation on the heat flux sensor by using FLUENT software

이 경우 열저항층의 두께가 높은 상태에서 금속이 쉽게 증착되지 않는 현상이 발생하여 서모파일을 형성하기 곤란한 단점이 있다. 본 연구에서는 이러한 단점을 보완하고 센서의 표면에 열저항 물질의 돌출이 발생하지 않는 새로운 열유속센서 디자인을 Fig.2(b)와 같이 개발하였다.

새롭게 제안된 열유속센서의 성능에 대한 검증을 위해 FLUENT 소프트웨어를 이용하여 Fig.2(b)의 센서구조에 대한 열전달 현상을 분석하였다. 열유속센서는 500 μm 두께의 실리콘 웨이퍼 상에 열저항이 낮은 물질인 실리콘과 열저항이 큰 물질인 SU-8을 실리콘 표면에 도포한 형태이며 그 두께는 100 μm이다. 열유동은 실리콘 웨이퍼의 하부면으로부터 열이 유입되고 상부면으로 유출되는 형태로 발생한다. 모델링 결과 열저항이 작은 실리콘에서는 얇은 박막 사이에서 온도차가 거의 나타나지 않는다. 그러나 열저항이 큰 SU-8에서는 같은 두께의 박막에서도 상대적으로 높은 온도차가 나타난다.

열 유동이 발생하는 경우 Fig.2(a)의 열유속센서의 상·하면간의 열 이동량은 식(1)과 같으며 온도차는 ΔT_{1,2}는 T₁-T₂로 나타낼 수 있다. 같은 조건에서 Fig.2(b)의 열유속센서를 이용하면 열저항이 낮은 물질의 경우 상면에서 측정되는 온도는 바닥면의 온도와 거의 같기 때문에 T₁으로 가정할 수 있다. 그리고 열저항이 큰 SU-8과 같은 물질의 경우 상면에서 측정되는 온도는 바닥면보다 낮은 온도인 T₃로 나타난다. 따라서 이 경우의 열유속은 식(2)와 같으며 온도차 ΔT_{1,3}는 T₁-T₃로 나타난다.

$$q_{comm} = -k_{Kapton} \cdot A \cdot \frac{(T_2 - T_1)}{\Delta x_{Kapton}} \quad (1)$$

$$q_{MHFS} = -k_{SU-8} \cdot A \cdot \frac{(T_3 - T_1)}{\Delta x_{SU-8}} \quad (2)$$

3.2 열유속센서의 제작

미세 열유속센서의 기판은 열전도도가 좋은 실

리콘 웨이퍼를 사용한다. 4 인치 지름을 갖는 실리콘 웨이퍼는 산화공정을 이용하여 실리콘 상에 SiO₂ 층을 형성한 후 가로와 세로의 길이를 각각 20 mm가 되도록 가공(dicing)한다. Fig.2(b)의 SU-8 로 이루어진 열저항층을 실리콘 웨이퍼 상에 선택적으로 남기기 위해서는 실리콘 웨이퍼는 벌크 에칭(bulk etching)해서 공간을 형성해야 한다. 열저항층에 해당하는 부위를 벌크 에칭하기 위해서는 열저항층의 패턴을 형성해야 한다. 이를 위하여 크롬 마스크와 positive PR 인 AZ-9260 을 이용한 patterning 을 수행한다. 실리콘 웨이퍼의 반대편 측면 부위는 SiO₂ 층의 손상을 방지하기 위하여 AZ-9260 을 페인팅 한다. Positive PR 을 이용한 패턴 형성 후, 패턴 내부의 SiO₂ 층을 제거하기 위하여 실리콘 웨이퍼를 BHF 용액에 담근다. SiO₂ 층이 제거된 실리콘 웨이퍼를 TMAH 용액에 담그면 실리콘 웨이퍼의 Si 가 시간에 따라 식각된다. 일정한 시간만큼 TMAH 용액에 담긴 실리콘 웨이퍼는 열저항 물질이 채워질 높이만큼 공간이 형성된다. 벌크 에칭된 부위에는 negative PR 인 SU-8 을 채워 넣고 고형화 시켜 열저항층을 형성한다. 실리콘 웨이퍼의 표면보다 돌출된 부위는 정밀 연마(polishing)를 수행하여 실리콘 웨이퍼의 표면과 동일한 두께로 형성한다. 서모파일을 이루는 금속은 구리와 니켈을 사용하였으며 각각의 금속은 shadow 마스크와 스퍼터링(sputtering)을 이용하여 500 nm의 두께로 증착한다. 센서로부터 신호선을 인출하기 위해 구리선을 실리콘 웨이퍼 상에 연결한다. 본 연구에서는 열저항층의 두께에 따른 열유속센서의 신호비를 비교하기 위하여 열저항층의 두께가 각각 50 μm와 100 μm 인 두 개의 미세 열유속센서를 제작하였다. 미세가공에 대한 제작공정은 Fig.4 에 나타나 있다.

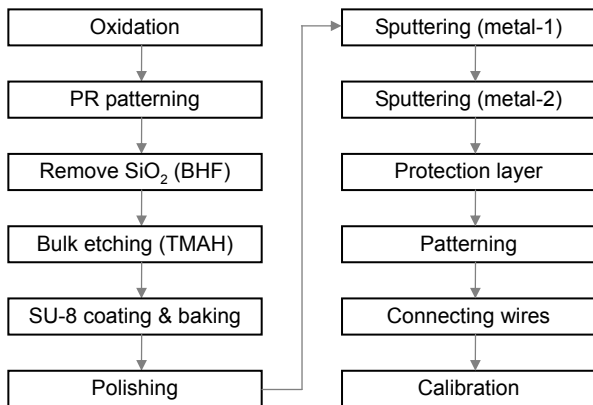


Fig. 4 Fabrication process of heat flux sensor

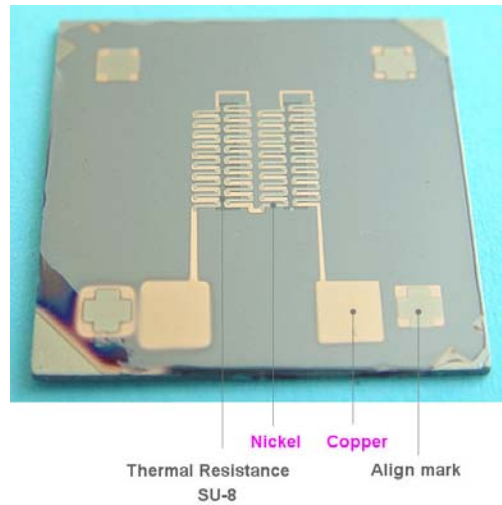


Fig. 5 Fabrication process of heat flux sensor

Fig.4 의 가공공정을 따라 제작된 미세 열유속센서는 Fig.5 에 나타나 있다. 각 단위공정의 초기와 말기 작업에서는 DI-water 를 이용한 세척과 질소 (N₂) 기체를 이용한 건조작업이 이루어진다.

4. 실험방법 및 결과

4.1 실험방법

MEMS 방식을 이용하여 제작된 미세 열유속센서는 대류형 열유속 검정장치에서 검정하였다. 대류형 열유속 검정장치의 주시험부의 온도는 50~75℃ 구간에서 벽면온도의 변화를 5~10K 간격으로 유지하였다. 또한 8,000 W 급 항온수조로부터 일정온도의 물을 공급 받는 소형풍동 내의 알루미늄 열교환기는 주시험부에 21.5℃의 공기를 공급한다. 벽면온도와 공기 간의 온도차는 28.5~53.5K 이다. 미세 열유속센서를 동판상에 부착하는 경우 동판과 열유속센서간의 열저항을 최소화하기 위하여 두께 0.05 mm의 열전도성 양면테이프(thermal conductive adhesive-9882, 3M)를 사용하였다. 미세 열유속센서의 경우 열기전력의 크기가 매우 작기 때문에 신호증폭기(AMP-6, Vatel)를 이용하여 데이터를 증폭하며 증폭된 신호는 데이터 수집기에서 전압의 값으로 열기전력을 측정한다. 본 연구의 실험조건은 Table 2 에 나타나 있다.

Table 2 Experimental conditions

condition	value
Reynolds number	0
Wall temp. (°C)	50/60/65/70/75
Air temp. (°C)	21.5

4.2 실험결과

열저항층의 두께가 각각 100 μm 와 50 μm 인 미세 열유속센서를 대류형 열유속 검정장치에서 검정하는 경우 표면온도와 공기의 온도차에 따라 민감도를 측정한 결과가 Table 3 에 나타나 있으며 Fig.6 은 민감도의 결과를 그래프로 나타내고 있다. 민감도는 온도차에 따라 크게 차이가 없으며 열저항층의 두께가 100 μm 와 50 μm 인 경우 민감도의 표준편차는 각각 1.83%, 3.76%를 나타낸다. 미세 열유속센서의 민감도는 열저항층의 두께가 100 μm 인 경우 평균적으로 $0.628 \text{ mV}\cdot\text{W}^{-1}\cdot\text{cm}^2$ 이며 열저항층의 두께가 50 μm 인 경우 평균적으로 $0.139 \text{ mV}\cdot\text{W}^{-1}\cdot\text{cm}^2$ 이다.

Table 3 은 대류형 열유속 검정장치에서 측정한 열기전력 값과 주어진 열유속의 값 및 민감도의 값이 나타나 있다. 여기서 민감도는 식(3)과 같이 표현한다.

$$S = \frac{emf}{q} \quad (3)$$

열저항층의 두께는 두 배의 차이가 나타나지만 민감도의 차이는 4.5 배인 것을 알 수 있다. 민감도의 차이가 나타난 원인을 살펴보면 다음과 같다. 우선 측정의 불확실성이 있다. 이는 2.2 절에서 언급되었다. 열유속센서를 제작하는데 있어 사용한 shadow 마스크의 선폭도 원인이 될 수 있다. 국내에서 shadow 마스크를 공급할 수 있는 제작사에서 제시한 최소 선폭의 두께는 100 μm 이다. 따라서 구리와 니켈을 이용한 접점은 가로와 세로의 폭이 각각 100 μm 가 되며 이는 미소 면적의 열저항층 상에서 상대적으로 큰 면적을 차지하게 되어 열유속 측정의 오차로 작용할 수 있다. 또한 금속의 선폭이 두꺼운 만큼 금속표면을 따라 측면으로의 열전도가 발생하여 열유속 측정의 오차로 작용할 수 있다. 마지막으로 벌크 에칭을 통해 생성된 공간의 두께에 대한 오차가 나타난다. TMAH 를 이용하여 실리콘을 식각하면 표면의 조도가 일정하지 않은 경향이 있으며 이는 열저항층의 두께에 영향을 줄 수 있다.

5. 결론

본 연구는 MEMS 를 이용하여 새로운 온도차 측정법과 구조를 갖는 미세 열유속센서를 개발하였다. 또한 이 센서를 자체 설계 및 제작된 대류형 열유속 검정장치에서 검정하여 민감도를 분석하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

1. 미세기전공학의 벌크 에칭법과 정밀 연마방법을 이용하여 열저항층의 두께 조절이 가능하고 균일 표면상에 서모파일을 구성하는 형태의 새로운 온도차 측정법을 구현하여 미세 열유속센서를 개발하였다.
2. 미세 열유속센서의 열저항층은 고형화된 SU-8 로 효과적으로 구성될 수 있으며 50 μm , 100 μm 두께의 미세 열유속센서를 대류형 열유속 검정장치에서 검정한 결과 열저항층의 두께에 비례한 민감도의 차이가 발생한다.

후 기

본 연구는 한국원자력연구소(KAERI)와 NRL 의 재정적 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

Table 3 Experimental results

model	$T_w - T_{air}$ (°C)	q'' ($\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$)	emf (mV)	sensitivity ($\text{mV}\cdot\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$)
Thermal resistance 100 μm	28.5	0.0214	1.41×10^{-2}	0.656
	38.5	0.0289	1.83×10^{-2}	0.631
	43.5	0.0327	1.97×10^{-2}	0.601
	48.5	0.0365	2.22×10^{-2}	0.608
	53.5	0.0402	2.60×10^{-2}	0.645
Thermal resistance 50 μm	28.5	0.0214	3.05×10^{-3}	0.142
	38.5	0.0289	3.95×10^{-3}	0.137
	43.5	0.0327	4.63×10^{-3}	0.142
	48.5	0.0365	5.03×10^{-3}	0.138
	53.5	0.0402	5.55×10^{-3}	0.138

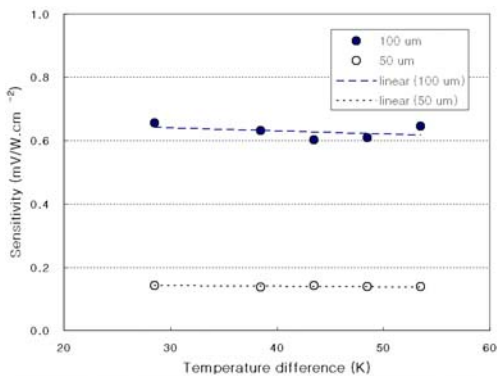


Fig. 6 Sensitivity of micro-machined heat flux sensor

참고문헌

- (1) Diller, T.E., 1993, "Advances in Heat Flux Measurements," *Advances in Heat Transfer*, Vol. 23, Academic Press.
- (2) Hayashi, M., Sakrai, A. and Aso, S., 1987, "A Study of a Multi-layered Thin Film Heat Transfer Gauge and a New Method of Measuring Heat Transfer Rate with It," *Japan Society Aeronaut. Space Sci. Trans*, Vol. 30, pp. 91-101.
- (3) Epstein, A.H., Guenette, G.R., Norton, R.J.G. and Cao, Y., 1986, "High Frequency Response Heat Flux Gauge," *The Review of Scientific Instrument*, Vol. 57, pp. 639-649.
- (4) Hager, J.M., Onishi, S., Langley, L.W. and Diller, T.E., 1989, "Heat Flux Microsensors," *In Transfer Measurements, Analysis and Flow Visualization (Shah, R. K. eds.)*, pp. 1-8, ASME, New York.
- (5) Hager, J.M., Simmons, S., Smith, D., Onishi, S., Langley, L.W. and Diller, T.E., 1991, "Experimental Performance of a Heat Flux Microsensor," *ASME J. Eng. Gas Turbines Power*, Vol. 113, pp. 246-250.
- (6) Chun, Jaechul, Oh, Seokhwan, Lee, Seung S. and Kim, Moo Hwan, 1999, "Design and Fabrication of Micro Heat Flux Sensor," *Proc. of the 1999 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 2, pp. 1045-1048.
- (7) Chun, Jaechul, Oh, Seokhwan, Lee, Seung S., and Kim, Moo Hwan, 1999, "Design and Fabrication of Micro Heat Flux Sensor," *Transducer '99*, pp. 414-417.
- (8) Gardon, R., 1960, "A Transducer for the Measurement of Heat Flow Rate," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 82, pp. 396-398.
- (9) Oh, Seokhwan, Lee, Kwangcheol, Chun, Jaechul, Kim Moo Hwan and Lee, Seung S., 2001, "Micro Heat Flux Sensor using Copper Electroplating in SU-8 Microstructures," *J. of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 11, pp. 221-225.
- (10) Hooncheul Yang, Chul Hwa Song, Moo Hwan Kim, 2004, "A Study on Calibration of Heat Flux Sensor by using Convective Heat Transfer," *KSME Journal (B)*. (reviewed)
- (11) Holmberg, D., Womeldorf C., 1998, "Report on the First-Generation NIST Convective Heat Flux Calibration Facility," *NIST Internal Report 6197*.
- (12) Holmberg, D., Womeldorf C., Grosshandler, W., 1999, "Design and uncertainty analysis of a second-generation convective heat flux calibration facility," *Proc. of the ASME Heat Transfer Division*, Vol. 4, pp. 65-70.