

## 실리콘 마이크로브리지를 이용한 유량센서

양준영\*, 민남기\*, 민석기\*\*  
\*고려대학교 \*\*한국과학기술연구원

### Thermal Flow Sensor Using Silicon Microbridges

Joon Young Yang\*, Nam Ki Min\*, Suk Ki Min\*\*  
\* Korea University \*\* KIST

**Abstract-** A silicon microbridge flow sensor has been developed. The heat transfer within silicon microbridge is modeled to predict the characteristics of the sensor. The flow sensor shows high sensitivity at small flow rate. This device is simple to fabricate, using standard IC and micromachining technology.

갖는 일반적인 전달방정식으로 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j}) + S \quad (1)$$

각 전달방정식에 대한 변수들을 정리하여 표 1에 나타내었다. 공기를 이상기체로 간주하여 밀도는 이상기체의 상태방정식으로부터, 동점성계수는 온도에 대한 3차함수의 계수를 Curve Fitting한 다음식으로부터 구하였다.

$$\mu = 2.287973E-6 + 6.25979E-8 \times T - 3.1319564E-11 \times T^2 + 8.15038E-15 \times T^3 \quad (2)$$

#### 1. 서론

공업계측분야에서 유속유량의 정밀측정을 위해 종래부터 다양한 방식의 유속유량 센서가 사용되고 있다. 최근에는 각종 센서에 마이크로컴퓨터에 의한 제어 방식이 채용됨에 따라 고전적 형태의 가동베인이나 혹은 열선식 대신에 양산성이 풍부하고 저가이며 신뢰성이 있는 소형 경량의 반도체 유량센서의 개발이 더욱 필요하게 되었다.

현재 실용화 되었거나 개발되고 있는 반도체 열형 유속 유량 센서의 경우, 원리적으로는 종래의 열선형과 동일하나 열선대신 실리콘 기판위에 트랜지스터, 집적 및 박막 저항, 써모파일(thermopile)등을 사용하여 초소형이면서도 열선형보다 감도 및 기계적 강도가 더욱 우수한 특성이 얻어지고 있다. [1-4]. 더구나 최신의 반도체 집적회로 기술을 이용하여 센서 소자와 신호처리 회로를 하나의 칩에 집적한 스마트 센서가 가능하고 대량생산에 적합하여 반도체 유량 센서는 금후 보급이 크게 기대되고 있다[4].

본 논문에서는 그림 1과 같이, 마이크로머시닝 기술에 의해 실리콘 다이아프램에 형성된 마이크로브리지를 이용하여 초소형 유속유량 센서를 제작하였다.

그림 1에서 유체의 방향에 수직인 두 저항변의 냉각율은 유체의 흐름에 평행한 두 저항변보다 크므로 브리지 저항은 불평형되어 출력전압이 발생한다. 그러므로 저항변사이의 열적 절연은 센서의 출력에 매우 중요하다. 본 구조는 브리지 각 변이 공기에 의해서 열절연되어 있고 또 얇은 다이아프램에 형성되기 때문에 소자의 열용량이 대폭 감소되므로 종래의 플레타형 브리지 회로에서 발생하는 불균일한 발열, 저항의 열적단락에 의한 감도저하, 긴 응답속도특성등과 같은 단점을 개선할 수 있을 것이다.

#### 2. 마이크로브리지의 열전달 해석

그림 1의 브리지에서 센서동작에 가장 중요한 부분만(점선영역)을 독립적으로 분리하여 유동 및 열전달을 해석하였다[5]. 공기를 연속체로 취급하였고, 압축성이며 상태량은 온도만의 함수로 가정하였다. 그림 1에 대한 정상상태 2차원 지배 방정식은 대류항과 확산항, 생성항을

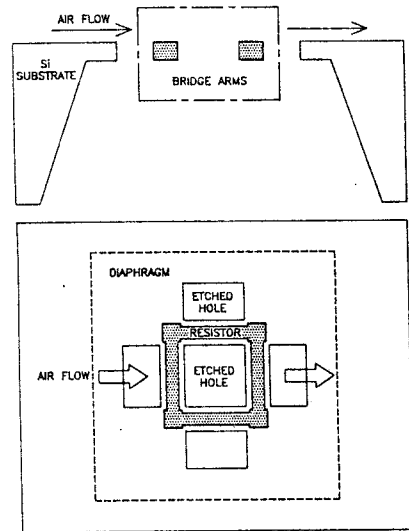


그림 1 유량센서의 구조

Table 1. The Form of terms in general equation for  $\phi$

Equation	$\phi$	$\Gamma$	S
Continuity	1	0	0
x -Momentum	$u$	$\mu \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{3} \mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} \right)$	
y -Momentum	$v$	$\mu \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{3} \mu \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} \right)$	
Energy(Air)	$T$	$\frac{k}{C_p}$	0
Energy(Si)	$T$	$\frac{k}{C_p}$	$\dot{q}_{gen}$

앞에서 유도한 지배방정식들은 대류항과 확산항이 서로 영향을 미치며 연립되어 있는 타원형 방정식이기 때문에 반복적인 계산을 요구하므로 적절한 수치해석 방법을 택하여야 한다. 모든 전달방정식은 검사체적에 대하여 적분한 후 Power-Law Scheme을 이용하여 이산화(Discretization)시켰고, 또한 격자망은 브리지 저항 주위의 해석을 자세히 하기 위하여 각 저항 주위는 조밀하게 하고 저항으로부터 멀어지면서 등비급수로 팽창(Stretching)되도록 하였다. 계산에 사용된 상온의 공기와 실리콘의 1기압 300 K에서 물리적 상태량은 다음과 같다. 공기: 정압비열  $C_p=1.0057$  [kJ/kg·K], 열전도계수  $k=0.02624$  [W/m·K], 실리콘:  $C_p=0.7$  [kJ/kg·K],  $k=150.0$  [W/m·K].

그림 2는 입구에서 공기 온도를 300 K로 가정했을 때, 주유동 방향의 여러 위치에서 온도분포를 도시한 것이다. 상류쪽에 위치한 변의 온도분포를 보면, 변 내부에서는 속도가 0 이고 열전도계수가 크고 계속 일정한 열공급이 있으므로 같은 온도를, 변에서 멀어질수록 점진적으로 온도가 감소하여 입구와 동일한 온도로 된다. 두 변사이에서는 열원이 없고 거의 대류에 의한 열전달만 있으므로 유동장의 온도가 상류쪽보다 조금 낮아진다. 한편, 상류쪽 변으로부터의 열전달에 의해 유동장의 온도가 약간 상승하였으므로 하류쪽 변의 온도는 상류쪽 변보다 약간 높고, 대칭축에서 멀어질수록 점진적으로 자유유동 온도로 된다. 마지막으로, 출구에서 온도는 유동에 의한 대류열 전달과 확산에 의한 열전달로 인하여 대칭축에서 먼 곳까지 온도가 입구에서 주어진 온도보다 약간 상승하였으며 이 온도차이는 두 저항에서 공급된 열량과 일치한다. 그리고 입구에서 주어진 온도와 같아지는 지점들을 연결하면 열경계층(Thermal boundary layer)이 됨을 알 수 있다. 위와 동일한 조건하에서 플레나 브리지의 온도분포를 계산하면 그림 3과 같다. 저항변 사이의 온도차가 매우 작아 거의 열적으로 단락된 상태로 됨을 알 수 있다. 따라서, 그림 1의 구조가 유속유량센서로서 우수한 특성을 갖는다고 예측할 수 있다.

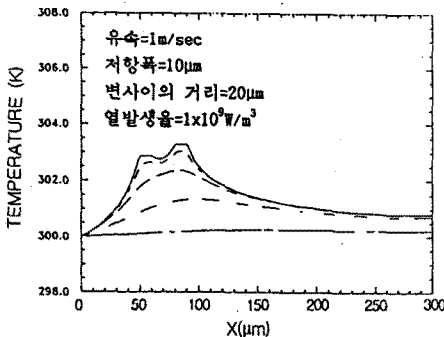


그림 2 주유동방향 여러지점의 온도분포

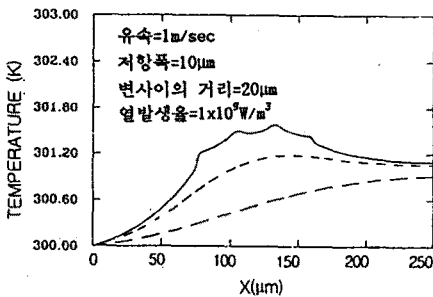


그림 3 플레나 브리지 구조에서 온도분포

그림 4은 브리지 저항에서 발생하는 열량을 변화시켰을 때의 상류쪽 변과 하류쪽 변의 온도차를 나타낸 것으로, 발열량이 증가함에 따라 두 변의 온도차가 거의 선형적으로 증가함을 볼 수 있다.

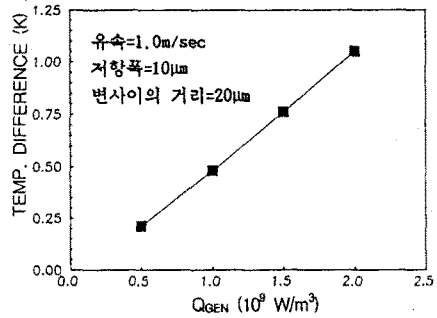


그림 4 발열량의 변화에 따른 저항의 온도차변화

그림 5는 두 변사이의 거리에 따른 온도차를 도시한 것으로, 온도차이는 두 변 사이의 거리가 멀어질수록 증가하지만 현재의 조건하에서는 0.75 K 정도의 값으로 수렴되는 것을 알 수 있다.

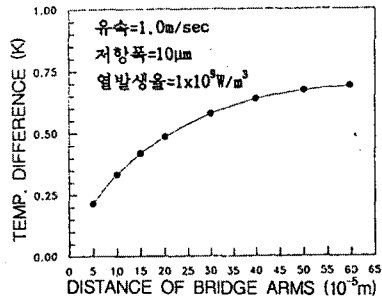


그림 5 변 사이의 거리 변화에 따른 저항의 온도차변화

### 3. 센서설계

본 유량 센서의 출력은 두 저항변사이의 온도차에 비해 하므로 브리지변 사이의 거리, 즉 예정된 홀의 크기가 온도차, 출력, 칩의 크기를 결정한다. 두 저항변이 너무 근접하면 서로 열적으로 단락되어 온도차는 급격히 영으로 되고, 홀의 크기가 어느 정도이상으로 되면 두 변은 서로 고립된 상태로 되어 온도차는 일정하게 된다. 따라서 주어진 발열량에 대해 두 변의 최적거리가 존재한다. 그림 4에서 보는 바와같이 발열량이 증가하면 온도차도 증가하고, 홀의 크기도 크게할 수 있다.

한편, 반도체 저항의 온도 계수는 불순물 농도에 의해서 결정된다. 반도체의 비저항에 대한 식(3)

$$\rho = \frac{1}{q(n\mu_e + p\mu_h)} \quad (3)$$

과 인용논문 [1]에 주어진 이동도에 대한 식을 사용해서 불순물 농도가 다른 여러 시료에 대해 저항율의 온도의 온도 계수를 계산하면 그림 6과 같다. 각 불순물 농도에 대해 저항율이 최대가 되는 천이온도가 존재하고, 이 온도 이상에서 저항은 빠르게 감소하여 온도계수는 부(-)로 된다. 또 불순물 농도가 증가하면 전기저항의 온도 의존성은 현저히 낮아짐을 알 수 있다. 그러므로 센서의 감도를 높이기 위해서는 불순물 농도가 낮은 것이 요구된다. 이 경우 센서의 출력 저항이 증가한다.

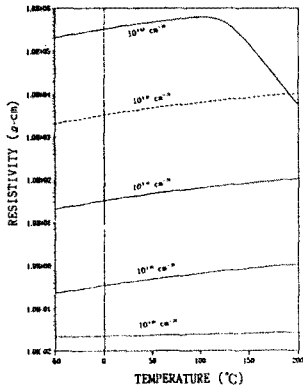


그림 6 실리콘 저항의 온도 의존성

#### 4. 센서제작 및 특성

센서 제작 과정은 그림 7과 같다. 비저항이 1-20 Ω-cm, n형 및 p형 (100) 4" 웨이퍼에 0.5 μm 두께의 산화막을 형성하였다. 산화막의 두께는 사용하는 에칭용액과 에칭

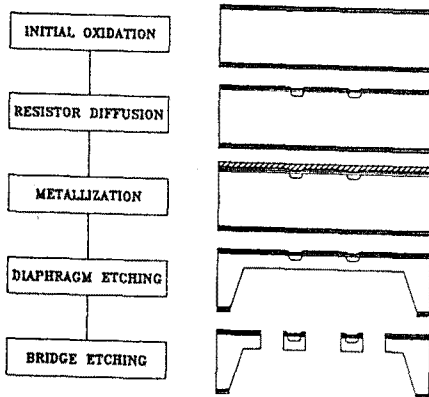


그림 7 실리콘 유속유량센서의 제작과정

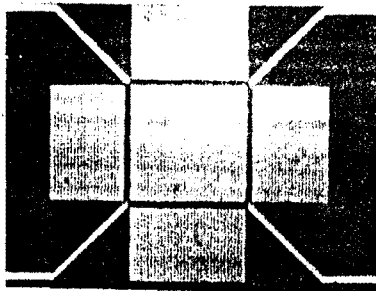


그림 8 제작된 유량센서

시간에 따라 달라진다. 브리지 저항은 인(p)을 ion implant한 후 장시간 drive-in하였다. 저항의 불순물 농도는  $10^{16}$ - $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 로 하였다. 또한 실리콘 브리지 자체를 저항으로 사용하는 경우에는 접촉을 위한 확산막을 행하면 된다. Al을 1μm 두께로 스퍼터링한후 패터닝하여 전극을 형성하였다. 브리지 저항을 열적으로 절연하기 위한 홀과 다이어프램을 형성하기 위해서 앞면의 패턴에 뒷면의 패턴을 일라인하여 패터닝한 후, EDP 에칭 시스템을 사용하여 웨이퍼 뒷면으로부터 이방성 에칭을 행하였다. 이때 앞면은 에칭용액으로부터 보호된다. 다음 웨이퍼 앞면으로 부터 에칭을 하여 마이크로브리지를 완성하였다. 그림 8은 제작된 유량센서의 현미경 사진이다.

그림 9는 일차적으로 시작한 유량센서의 출력 특성을 나타낸 것으로, 감도가 매우 우수하며 구동전류가 증가하면 감도도 증가함을 알 수 있다.

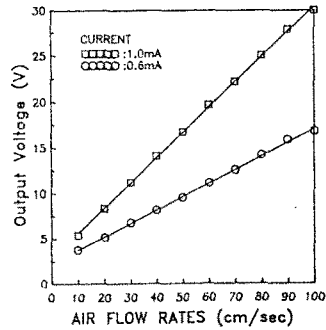


그림 9 유량센서의 출력특성

#### 6. 결론

본 논문에서는 실리콘 마이크로 브리지를 이용한 초소형 유량 센서를 설계하고 제작하였다. 실리콘 브리지 설계에 필요한 기초자료를 얻기 위해서 브리지 저항사이의 거리 및 저항에서의 발열량 등을 주요 인자로 하여 마이크로 브리지 주위의 온도분포를 해석하였으며, 3차원 브리지는 종래의 플레나 구조에 비해 두 저항변 사이의 온도차가 뚜렷함을 알 수 있었다.

표준의 집적회로 공정과 마이크로머시닝 기술을 이용하여 제작된 센서는 저유속에서 우수한 출력 특성을 나타내었다. 현재, 여러 형태의 유량센서와 신호처리 칩을 설계 제작중에 있으며 차후에 보고하고자 한다.

#### 참고문헌

- [1] A. F. P. van Putten and S. Middelhoeck, "An Integrated Silicon Anemometer," *Electronics Letters*, Vol. 10, 1974, pp. 425-426.
- [2] A. F. P. van Putten, "A constant voltage, Constant-Current Wheatstone Bridge Configuration," *Sensors and Actuators*, Vol. 13, 1988, pp. 103-115.
- [3] B. W. van Oudheusden, "Silicon Thermal Flow Sensors," *Sensors and Actuators*.
- [4] J. W. Bosman, J. M. De Bruijin, F. R. Riedijk, B. W. van Oudheusden and J. H. Huijsing, "Integrated Smart Two-Dimensional Thermal Flow Sensor with Seebeck-Voltage-to-Frequency Conversion," *Sensor and Actuators*, A. 31 (1992), pp. 9-16.
- [5] 황호영, 김호영, 민남기, "실리콘 브리지의 유동 및 열전달 해석," 대한 기계학회 '92년도 추계학술대회 논문집(II), pp. 130-133.