

# 질량흐름 제어기의 센서 튜브에서 열전달현상에 관한 연구 A Study of Heat Transfer Phenomena in a Sensor Tube of a Mass Flow Controller

이상경 · 김영수

S. K. Lee, Y. S. Kim

**Key Words** : Mass Flow Controller(질량흐름 제어기), Heating Wire(열선), Thermocouple(열전대), Conduction(전도), Convection(대류)

**Abstract** : In this paper, the heat transfer phenomena in the sensor tube of a mass flow controller(MFC) were studied by experiments. In the sensor tube of MFC, the difference of temperature between inlet and outlet was necessary for calculating the mass flow rate. Therefore, the relations of flow rate, generated heat by heating wire, sensor location and tube thickness were investigated to find the optimized condition. Based on this study, static and dynamic characteristics of sensor can be used for mass flow controller.

## 기호 설명

- Q : 열량[J]
- $c_p$  : 비열[J/Kg · °C]
- $\Delta T$  : 입출구의 온도차[°C]
- SCCM: 분당 입방 센티미터  
(standard cubic centimeter per minute )

## 1. 서 론

화학반응공정에서 가스 흐름의 측정과 제어의 정밀성은 매우 중요하다<sup>1)</sup>. 특히 반도체 제작공정에 사용되는 질량 흐름 제어기(mass flow controller, MFC)는 프로세싱 챔버(processing chamber)내로 설정된 질량흐름을 안정적으로 공급해야 한다. 반도체등의 웨이퍼 제작공정에서 질량 흐름 제어기의 개발이 요구되는 대표적인 공정으로 스퍼터링(sputtering)이 있다. 이 공정은 증착판과 재료사이에서 공급되는 가스의 질량을 다양한 방법으로 측정하여 이를 설정값과 비교하여 제어하는 시스템이다. 가스 질량의 흐름을

측정할 때는 온도, 압력, 점도 등에 따라 보정되어야 한다. 센서튜브의 입출구 온도 차를 이용하여 가스의 질량을 직접 측정하는 질량 흐름 제어기는 센서 튜브(sensor tube), 주 본체와 제어 밸브로 구성되어 있다. 센서튜브는 열선과 센서선이 스테인레스(stainless) 튜브주위에 감겨 있다. Fig. 1과 같이 구성된 센서에서 가스의 흐름은 입구튜브의 온도를 하강시키고 열선에 의해 가열된 튜브의 벽을 통하여 가스의 흐름으로 전달되며 온도가 상승된 가스의 흐름으로 인해 출구 튜브로 전달된다. 센서 튜브에서의 열전달은 열선의 열 발생, 튜브 벽에서의 전도(conduction), 가스에서의 대류(convection)등이 동시에 일어난다. 이러한 현상을 규명하기 위하여 많은 연구가 이루어졌다.

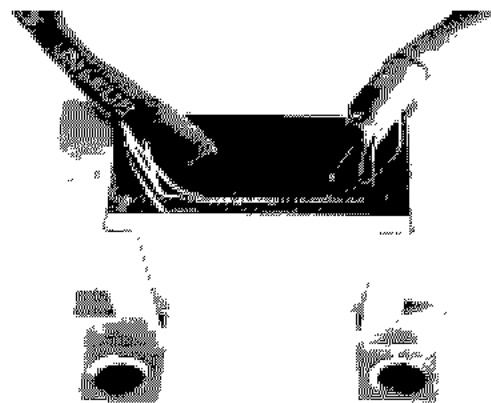


Fig. 1 Photograph of sensor in the MFC

접수일 : 2003년 4월 16일  
 이상경(책임저자) : (주)엠펜인  
 E-mail : sslsk@hitel.net Tel:018-311-6549  
 김영수 : 부경대학교

1차원 해석 방법<sup>2)</sup>, 2차원 모델링<sup>3)</sup>, 벽의 온도와 가스 평균온도등<sup>4)</sup>의 연구가 있으나 너셀 수(Nusselt number), 경계 조건 등의 설정에 많은 가정을 포함하고 있어 상용에 적용하는 것은 한계가 있다.

본 논문에서는 실험을 통하여 질량 흐름 제어기에 사용가능한 센서를 설계하기 위하여 튜브 벽의 두께, 열선에 공급되는 전력, 열선과 센서의 위치, 질량 흐름 사이의 관계를 조사하고 이 결과를 질량흐름제어기의 센서에 사용 가능함을 확인하였다.

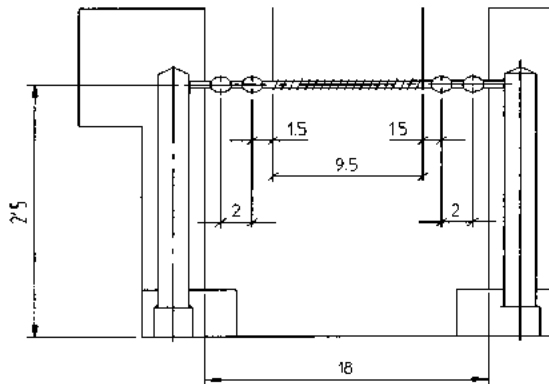


Fig. 2 Dimension of sensor tube in the MFC

## 2. 질량 유량 센서

### 2.1 실험의 목적

가스가 흐르는 금속튜브를 가열할 때 튜브의 입구와 출구에서 온도차가 발생한다. 가스의 유속이 빨라지면 온도차도 증가하므로 다음의 식에서 흐르는 가스의 질량을 구할 수 있다.

$$m = \frac{Q}{c_p \Delta T}$$

여기서 Q는 열량,  $c_p$ 는 비열,  $\Delta T$ 는 입출구의 온도차이다. 실험의 목적은 제어기에 사용 가능한 선형성, 분해능, 빠른 응답시간 등이 확보되는 안정적인  $\Delta T$ 를 구현하는 것이다. 이를 위하여 전압, 전류, 열선의 길이에 의해 결정되는 발생열량, 튜브 벽의 두께, 센서의 위치, 전도와 대류의 영향을 조사하기 위하여 유량이 없는 경우, 유량이 있는 경우에 대하여 실험을 행한다.

### 2.2 실험 조건

반도체 제작공정에 사용되는 질량 흐름 제어기는 질소로 보정을 하므로 질소를 사용한다. 가스의 순도는 99.999%, 0.75PPM의  $O_2$ , 5PPM이하의  $H_2O$ 로 구성되어 분석정밀도는  $\pm 2\%$ 이다. 가스는 40리터의 압력용기로부터 레귤레이터(regulator)와 측정밸브를 거쳐 센서로 공급된다. 측정밸브는 린텍(Lintec)사의 300 SCCM을 사용하였고 정밀도와 반복정밀도는  $\pm 1\%$ 와  $\pm 0.15\%$ 이다. 열선에 공급되는 전력의 정밀도는  $\pm 1\%$ 이다. 열선은 직경이 0.04mm, 저항은 855 $\Omega$ /m이고 튜브외경에 22회를 감았다. 성분은 니켈52%, 철 24%, 크롬14, 탄소8%로 구성되어있다. 센서의 튜브에 관련된 치수는 Fig. 2와 같으며 가스는 오른쪽으로부터 왼쪽으로 흐른다. 재질은 스테인레스 강 316L로 외경은 1.1mm, 0.9mm, 0.8mm이고 대응하는 내경은 0.8mm, 0.65mm, 0.5mm이다. 튜브외부의 단열재는 산업용 에폭시수지와 경화재를 50%씩 혼합하여 사용하였다. 센서는 오메가 사의 K 방식 열전대를 사용하였으며 직경은 0.07mm이다.

## 3. 실험 결과

### 3.1 유량이 없는 센서

센서 튜브 내에 유체의 흐름이 없을 때 튜브두께별, 인가전압별로 실험을 하면 대류가 없는 상태에서 튜브 벽을 따라 전도가 일어나며 열선으로부터 좌우측에 각각 1.5mm와 2mm의 위치에 센서를 그림의 좌측부터 S1, S2, S3, S4으로 하면 Fig. 3, 4, 5와 같이 열선이 가까운 S2, S3와 열선에서 먼 S1, S4를 측정하였을 때, S2와 S1, S3와 S4의 차로부터 전도도 인한 각 구간의 온도 구배를 예측할 수 있다. 또한 7볼트의 전력공급으로 발생하는 열원을 센서로서 사용할 수 있고 튜브두께가 얇을 때 전도성이 좋음을 알 수 있다.

### 3.2 유량이 있는 센서

가스의 흐름이 있는 센서의 경우에 입력의 변화량에 따라 관측 가능한 출력 분해능을 확보하기 위하여 입출구의 온도차가 크며, 선형성이 있고, 응답시간이 빠른 센서를 구현하는 것을 목적으로 유량, 센서의 위치, 튜브 벽의 두께별로 실험을 한다.

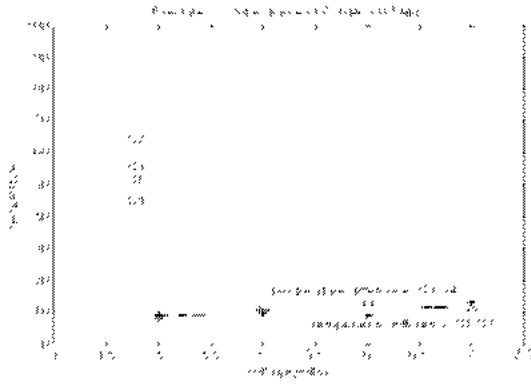


Fig. 3 Temperature gradient(thickness 0.15mm)

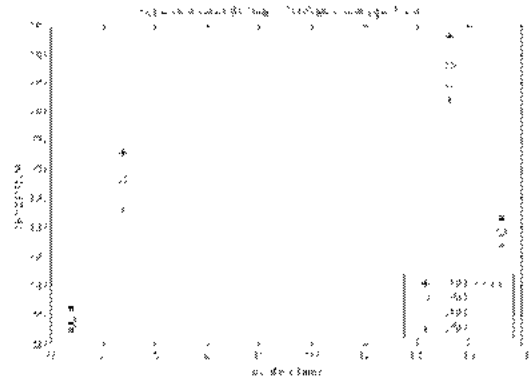


Fig. 7 Temperature distributions versus flow rate

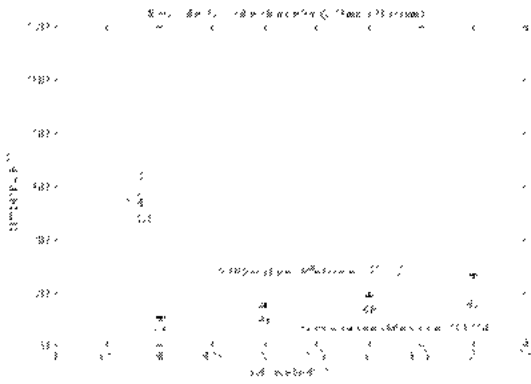


Fig. 4 Temperature gradient(thickness 0.125mm)

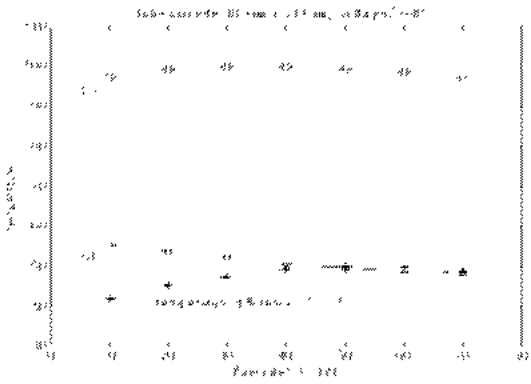


Fig. 8 Temperature difference(S1-S3)

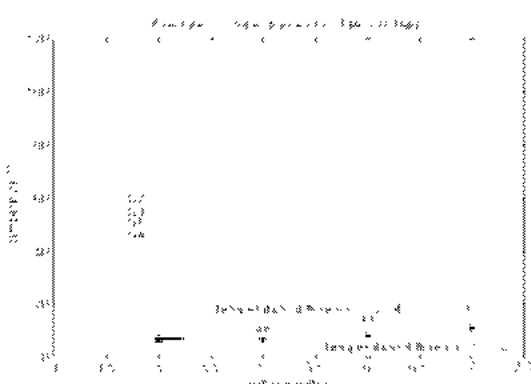


Fig. 5 Temperature gradient(thickness 0.15mm)

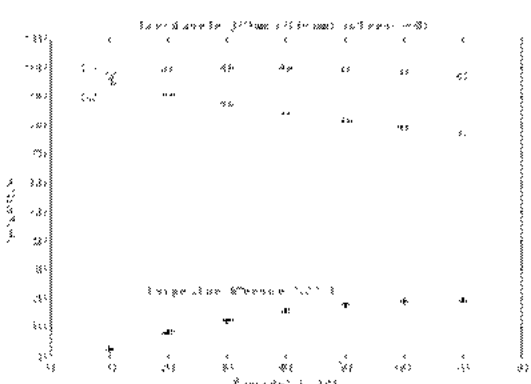


Fig. 9 Temperature difference(S2-S3)

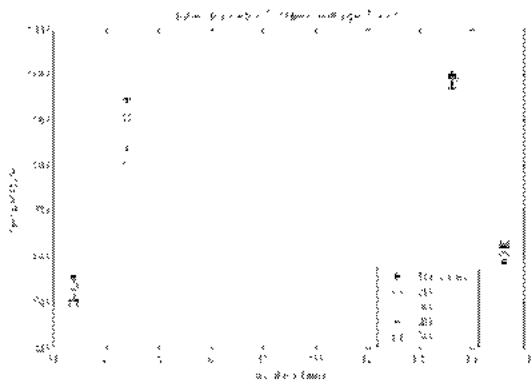


Fig. 6 Temperature distributions versus flow rate

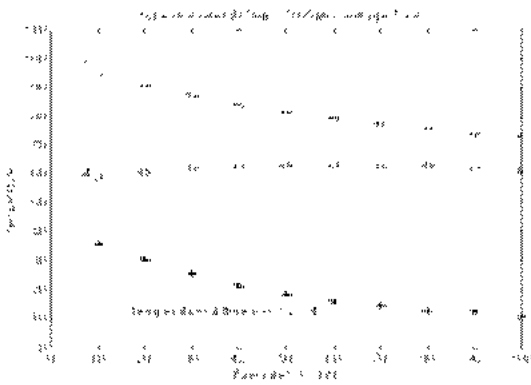


Fig. 10 Temperature difference(S2-S4)

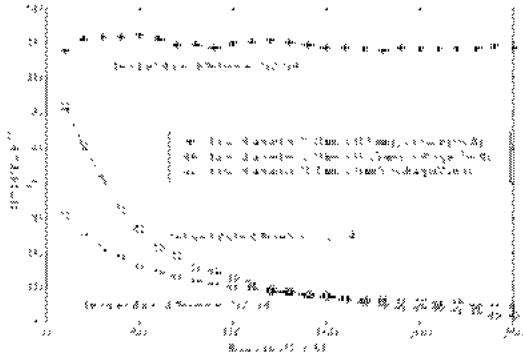


Fig. 11 Temperature distributions versus diameter

### 3.2.1 유량별 비교

Fig. 6은 외경 0.9 mm의 튜브에 7볼트의 전원을 공급한 경우로 유량이 증가함에 따라 S1, S2는 감소하고 S3, S4는 증가한다. 이는 튜브내의 가스의 흐름이 S1, S2에서 열을 빼고 S3, S4에는 열을 공급하기 때문이다. 이는 대류로 인한 현상으로 50SCCM 이상의 Fig. 7과 비교할 때 50SCCM 이하에서 입출구 사이의 온도차의 차이가 크다. 이때 열선에서 발생하는 열과 유량에 따른 대류에서 빼기는 열의 효과가 50SCCM전후에서 분해능의 임계치를 나타낸다.

### 3.2.2 센서위치별 비교

전압 7볼트를 공급하고 외경 0.9mm의 센서에서 입구와 출구의 온도 차이를 비교할 때 Fig 8은 유량이 증가함에 따라 분해능이 포화되는 현상을 보이고 Fig. 9는 유량에 따른 S2의 온도변화가 주도적으로 온도차의 증가에 반영되고, Fig. 10은 유량에 따라 S2와 S4의 온도변화가 동시에 변화하여 온도차가 증가하여 센서로서의 정특성인 입력과 출력과의 관계가 선형이고 유량과 온도차 사이에 센서로서 분해능을 확보할 수 있다.

### 3.2.3 튜브 벽의 두께 비교

Fig. 11과 같이 7V의 전압이 가해질 때 두께별로 온도차를 분석하면 두께가 0.125 mm인 튜브에서 두께 0.15mm의 튜브와 비교하여 안정적인 온도차를 구할 수 있다. 이를 근거로 가스의 흐름이 있는 경우 튜브벽을 통한 대류가 열전달을 주도함을 알 수 있다.

## 4. 실험장치 및 회로

Fig. 12는 질량의 흐름을 측정하는 장치이다. 센서 신호를 입력으로 받아서 12비트 AD 변환 회로를 거

쳐서 외부 잡음 신호를 제거하기 위해 아날로그 필터를 통과하면 100Hz 미만의 잡음을 차단한다. AD회로에서 입력은 16진수로 읽어서 Fig. 13과 같이 0 SCCM에서 200 SCCM으로 스텝입력을 인가하고 500Hz로 샘플링하여 시간영역에서 센서의 응답시간 특성을 구하였으며 정상상태의 95%에 이르는 시간이 0.8초로서 동특성이 확보된다.

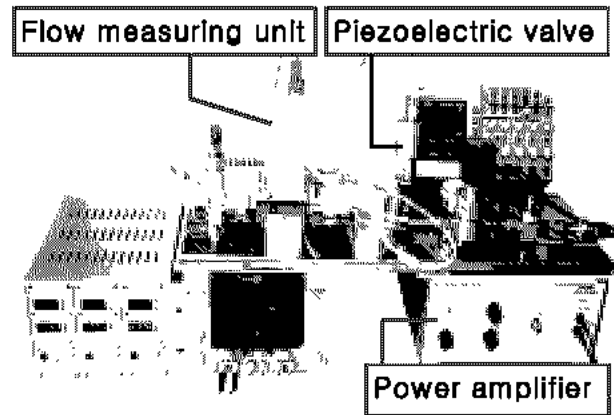


Fig. 12 Measurement system of flow rate

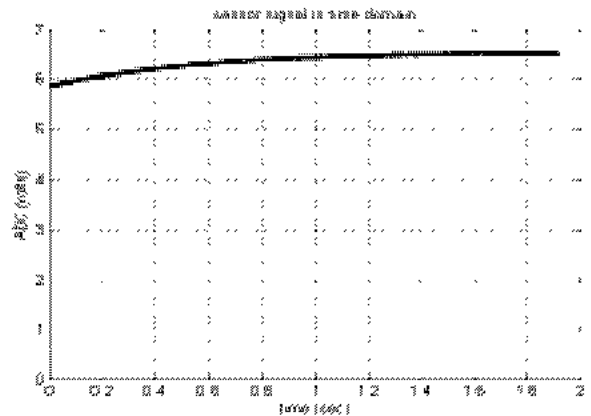


Fig. 13 Response of step input

## 5. 결 론

가스의 흐름이 없는 튜브 벽에서 전도현상에 기인한 온도구배가 생길 수 있는 적정한 공급 전력과 튜브 벽 두께를 찾아내고, 가스의 흐름으로 인한 히터와 가스간의 대류현상이 발생할 때는 50SCCM까지의 유량이 센서의 분해능으로서 좋은 것을 알 수 있다. 센서의 위치에 의한 효과는 튜브 입구는 S2에서 튜브 출구는 S4에서 대류로 인한 효과가 가장 크다. 따라서 S2와 S4의 온도 차이를 사용할 때 응답시간

성능을 확보할 수 있으므로 질량 흐름 제어기의 센서로 사용할 수 있다.

### 참고 문헌

1. J. M. Benson, W. C. Baker, E. Easter, 1970, "Thermal Mass Flowmeter", Instrument Control System. Vol. 43, pp. 85~87.
2. K. Komiya, F. Higuchi, K. Ohtani, 1988, "Characteristics of a Thermal Gas Flowmeter", Rev. Scientific Instrument, Vol. 59, No. 3, pp. 477~479.
3. L. D. Hinkle, C. F. Mariano, 1991, "Toward Understanding the Fundamental Mechanisms and Properties of the Thermal Mass Flow Controller", Journal Vacuum Technology, Vol. 9, pp. 2043~2047.
4. P. Rudent, P. Navratil, 1998, "Design of a New Sensor for Mass Flow Controller Using Thin Film Technology Based on an Analytic Thermal Model", Journal Vacuum Scientific Technology, Vol. 16, pp. 3559~3563.
5. 이만형, 2000, "메카트로닉스", 사이텍미디어, pp. 16-21.
6. M. Necati Ozisik, "Basic Heat Transfer", McGraw-Hill Company (Chapter 6).
7. Rolf H. Sabersky, "Fluid Flow", Macmillan (Chapter 2).
8. S. F. Richard, 1995, "Theory and Design for Mechanical Measurements", second ed., Wiley, New York (Chapter 5).
9. J. P. Holman, 1990, "Heat transfer", seventh ed., McGraw-Hill, New York (Chapter 2).