

질량유량제어기용 센서튜브의 정특성과 동특성에 관한 연구

이 상 경† · 김 영 수*

(원고접수일 : 2003년 8월 12일, 심사완료일 : 2003년 11월 8일)

Dynamic and Static Characteristics of Sensor Tube for Mass Flow Controller

Sang-Kyung Lee† , · Young-Soo Kim*

Abstract : In this paper, the static and dynamic characteristics 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 among flow rate, heat generated by heating wire, and sensor location were investigated to find optimized condition. Finally, the relation between sensor voltage through analog digital conversion(ADC) and flow rate in the sensor tube can be represented. Based on this study, static and dynamic characteristics of sensor tube can be used for design of mass flow controller.

Key words : Mass Flow Controller(질량유량제어기), Heating Wire(열선), Static Characteristics (정특성), Dynamic Characteristics(동특성), Analog Digital Conversion(ADC, 아날로그 디지털 변환)

기호설명

Q : 열량 [W]
 ρ : 밀도 [kg/m^3]
 C_p : 정압비열 [$\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$]
 ΔT : 입·출구의 온도차 [K]
 U_{mean} : 평균속도 [m/s]
 k : 열전도 [$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$]

1. 서론

화학반응공정에서 가스 유량의 측정과 제어의 정밀성은 매우 중요하다⁽¹⁾. 특히 반도체 제작과정에 사용되는 질량 유량 제어기(mass flow controller, MFC)는 프로세싱 챔버(processing chamber) 내로 설정된 질량 유량을 안정적으로 공급해야 한다. 반도체 등의 웨이퍼 제작공정에서 질량 유량 제어기의 개발이 요구되는 대표적인 공정으로 스퍼터링(sputtering)이 있다. 이 공정은 증착판과

† 책임저자((주)엠펜인), E-mail : ssslk@hitel.net, T : 018-311-6549

* 부경대학교(기계공학부)

재료가 있는 챔버 내부로 공급되는 가스의 질량을 다양한 방법으로 측정하여 이를 설정값과 비교하여 제어하는 시스템이다. 챔버 내부로 공급되는 유량을 측정할 때 체적 측정기(volumetric meter)는 가스의 질량을 측정하기 위하여 온도, 압력, 점도 등의 조건이 변함에 따라 보정되어야 한다. 그러나 질량 유량 제어기는 이러한 보정을 거치지 않아도 되며, 센서 튜브의 입출구 온도차를 이용하여 가스의 질량을 직접 측정하는 질량 유량 센서(mass flow sensor)와 센서의 신호와 설정치의 차이를 이용하여 가스의 유량을 제어하는 제어 밸브(control valve) 및 이들이 고정된 주 본체(main body)로 구성되어 있다. Fig. 1은 질량 유량 센서로서 가스가 흐르는 스테인레스(stainless) 튜브, 튜브 외부에 감겨있는 열선과 온도 센서로 구성되어 있으며, 온도 센서는 열선의 좌측에서 출구의 온도를 측정하고 우측에서 입구의 온도를 측정한다. 튜브를 통하여 입구로부터 출구로 흐르는 가스는 입구의 튜브 벽의 온도를 하강시킨다. 열선에 의하여 발생하는 열이 튜브 벽을 거쳐 가스로 전달되며, 이때 온도가 상승된 가스가 출구로 흐르면 출구 튜브의 온도를 상승시키게 된다. 따라서 센서 튜브에서의 열전달은 열선에서 열의 발생, 튜브 벽을 따라서 전도(conduction), 가스에서의 대류(convection) 등이 동시에 일어난다.

전도와 대류가 동시에 일어나는 열전달 현상을 규명하기 위하여 많은 연구가 이루어졌다. 1차원 해석 방법⁽²⁾, 2차원 모델링⁽³⁾, 벽의 온도와 가스 평균온도 등⁽⁴⁾, 소용량의 질량 유량 제어기⁽⁵⁾에 대한 연구가 있으나 너셀 수(Nusselt number), 경계 조건 등의 설정에 많은 가정을 포함하고 있어 실제에 적용하는 것은 한계가 있다.

따라서, 본 연구에서는 질량 유량 제어기에 사용가능한 질량 유량 센서를 설계하기 위하여 열선에 공급되는 전력, 열선과 센서의 위치, 질량 유량 사이의 관계와 ADC를 통하여 출력되는 디지털 센서 값에 대한 정특성과 동특성을 조사함으로써 연구결과가 질량 유량 제어기의 센서로서 사용 가능함을 확인하고자 하였다.

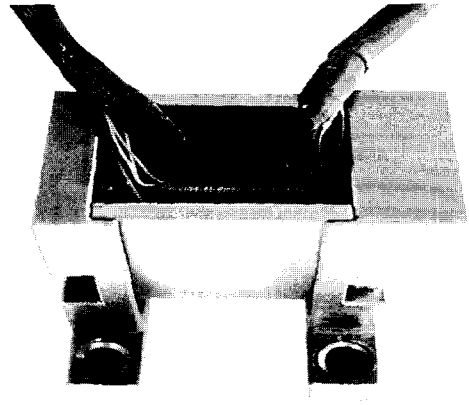


Fig. 1 Photograph of mass flow sensor in the MFC

2. 질량유량센서

2.1 실험의 목적

0.8 mm의 튜브에 300 cm³/min[standard cubic centimeter per minutes, SCCM]으로 질소가 흐를 때 레이놀드 수(Reynolds number)는 502로서 층류로 가정할 수 있다. 이때 튜브 내의 속도 분포는 다음과 같다.

$$u = 2U_{mean} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (1)$$

여기서 R은 튜브반경, r은 임의의 반경이다. 또한 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k \cdot r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \\ = \rho C_p u \frac{\partial T}{\partial x} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 x는 튜브의 길이이다.

식 (2)의 해를 구하기 위해서 경계조건에 많은 가정이 포함되어야 하므로 정확성을 기하기 어렵다. 이를 해결하기 위하여 가스가 흐르는 금속 튜브의 주위에 감겨진 히터로 가열할 때 튜브의 입구와 출구에서 온도차가 발생하고 가스의 유속이 빨라지면 온도차도 증가하므로 다음의 식에서 가스의 질량을 구하는 방법을 이용한다.

$$m = \frac{Q}{C_p \Delta T} \quad (3)$$

실험의 목적은 질량제어기에 사용 가능한 질량 유량 센서로서 조건을 구비하기 위하여 정특성인 선형성과 분해능, 동특성인 빠른 응답시간 등이 확보되는 안정적인 ΔT 를 구할 수 있는 조건을 찾는 것이다. 이를 위하여 전력과 저항에 의해 결정되는 발생 열량과 튜브 벽의 두께와 센서의 위치에 대한 전도와 대류의 영향을 조사하는 실험을 행한다.

2.2 실험조건

반도체 제작공정에 사용되는 질량 유량 제어기는 질소로 다양한 가스간의 보정을 한다. 가스의 순도는 99.999%, 0.75 PPM의 O_2 , 5 PPM 이하의 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, 측정된 질량 유량의 정밀도와 반복정밀도는 $\pm 1\%$ 와 $\pm 0.15\%$ 이다. 휴렛 팩커드(Hewlett Packard)의 직류 전원 공급기에 의해 열선에 공급되는 전력의 정밀도는 $\pm 1\%$ 이다. 센서에 관련된 치수는 Fig. 2와 같으며 열선은 직경이 0.04 mm, 저항은 855 Ω/m 로서 1m에 855 Ω 의 저항이 발생하고 튜브의 경에 20회를 감았다. 성분은 니켈 52%, 철 24%, 크롬 14%, 탄소 8%로 구성되어있다. 열선에 인가한 전력은 8V, 0.05A이다. 튜브의 재질은 스테인레스강 316L로 외경은 1.1 mm, 0.9 mm, 0.8 mm이고 대응하는 내경은 0.8 mm, 0.65 mm, 0.5 mm이다. 튜브 외부의 단열재는 산업용 에폭시수지와 경화재를 50%씩 혼합하여 사용하였다. 튜브의 외경에 부착시킨 온도 측정 센서는 오메가(Omega)사의 K 방식 열전대를 사용하였으며 직경은 0.07 mm이다. 이때 열선으로부터 1.5 mm에서 각각의 온도 측정 지점을 S1, S2, S3, S4라고 하며, 전원 공급 후 20초부터 온도를 측정하였다.

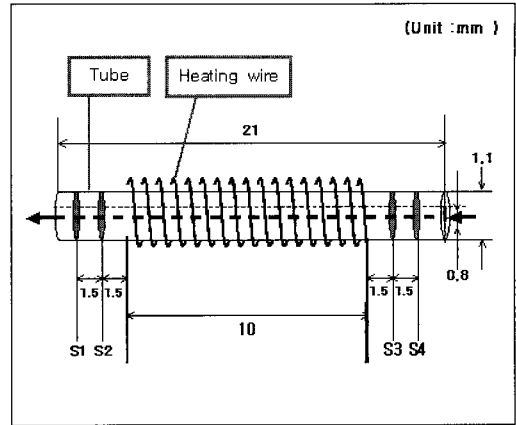


Fig. 2 Dimension of mass flow sensor tube in the MFC

3. 정특성

3.1 유량이 없는 센서

— 센서 튜브 내에 유체의 흐름이 없을 때 인가전압 별로 실험을 하면 대류현상이 없는 상태이고 Fig. 3에서 유속이 없는 경우인 0 SCCM일 때 열선에서 가까운 S2, S3와 열선에서 먼 S1, S4를 측정하였을 때, S2와 S1 지점의 온도차는 23 $^{\circ}C$, S3과 S4 지점의 온도차는 약 20 $^{\circ}C$ 가 발생하며 튜브의 길이방향으로 발생하는 온도구배로 인한 튜브의 반경방향으로 전도현상이 동시에 발생한다.

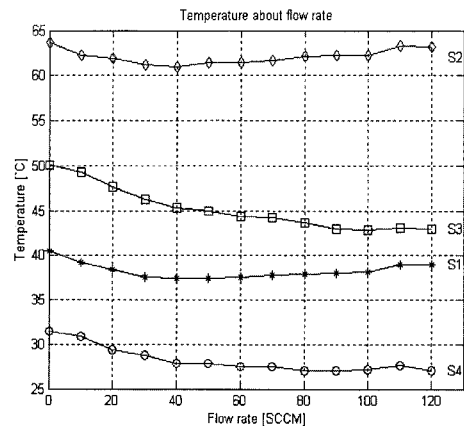


Fig. 3 Temperature of each sensor according as flow rate

3.2 센서별 유량에 따른 온도

Fig. 3은 공급가스의 압력이 10^5 Pa이고, 열선에 8V의 전압이 공급될 때 유량에 따른 각 센서의 온도변화이다. 가스의 흐름이 있을 때 출구측인 S1과 S2에서는 온도가 감소 후 증가하고 S3과 S4에서는 유량에 따라 온도가 감소한다. 즉 S1과 S2에서는 40 SCCM이상에서 열선에 의해 온도가 상승한 가스로부터 센서튜브로 대류로 인한 열전달 현상이 나타나고 S3와 S4에서는 차가운 외부 가스로부터 센서 튜브로 대류가 열전달 현상을 주도한다. Fig. 4는 S2와 S3에 열선에 공급되는 전압으로 인한 S2와 S3의 온도를 비교하였고, 전압에 비례하여 센서의 온도가 높아진다. Fig. 5는 8V가 열선에 공급될 때 각각의 센서간의 온도차를 나타내고, 열선을 중심으로 온도계측 위치가 대칭이며 온도차가 큰 S2와 S3를 질량유량제어기의 센서로 사용할 수 있다. Fig. 6은 S2와 S3의 온도 차이를 열선에 공급되는 전압별로 비교하였다. Fig. 7(a)와 (b)에서 각각의 센서위치에서 40 SCCM 이하에서 유량의 증가에 따라 온도가 하강하고, Fig. 7(c)와 (d)에서 40SCCM이상에서 유량의 증가에 따라 S1과 S2에서는 상승하고 S3와 S4에서는 하강한다. 이는 30SCCM의 MFC에 대한 시뮬레이션 결과⁽⁵⁾와 비슷한 경향을 나타낸다. Fig. 8은 가로축은 유량이고, 세로축은 온도센서에서 측정된 입구와 출구의 온도 차이를 ADC를 거쳐 측정된 전압으로 나타낸 것이다. 전열선의 인가전압이 증가할수록 유량 대 온도의 기울기가 증가함을 알 수 있다. 8V, 0.05A를 센서로 사용하고 입력을 유량, 출력을 ADC 전압으로 할 때 센서로서의 정특성인 입력과 출력과의 관계가 선형이고 비선형오차는 1%를 갖는다. 0에서 100SCCM까지의 유량범위에 대하여 풀-스케일 출력은 1.5V이며, 12비트의 ADC를 사용하였으므로 최소 0.6mV에 대한 유량을 계측할 수 있는 분해능을 갖는다. 또한 정밀도(accuracy)는 0에서 100SCCM의 전체 레인지에서 $\pm 1\%$ 이고, 온도감도(sensitivity)는 유량변화 1 SCCM당 $\pm 0.05\%$ 의 출력변화가 있다. 따라서 레인지, 선형성, 분해능,정밀도, 감도와 같은 성능특성을 만족하므로 센서로서 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

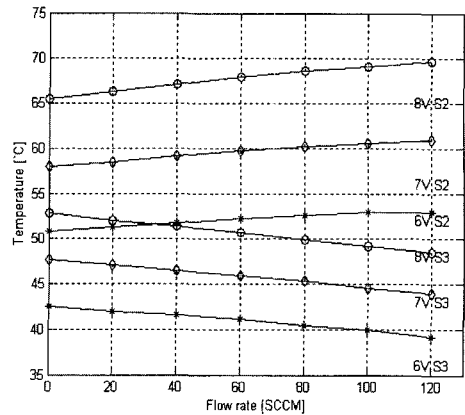


Fig. 4 Effect of supplied voltage

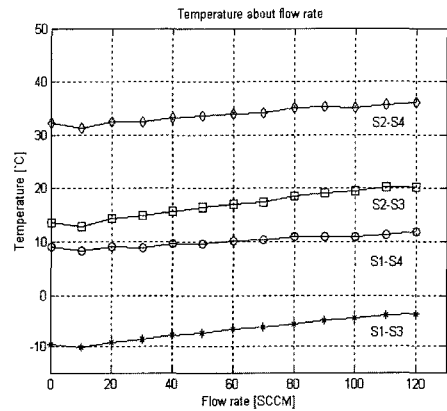


Fig. 5 Temperature difference according as sensor location

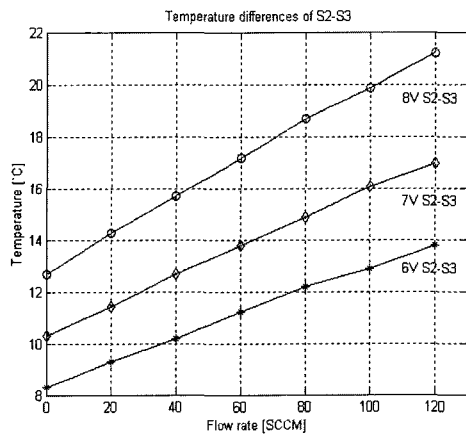


Fig. 6 Temperature difference between S2 and S3

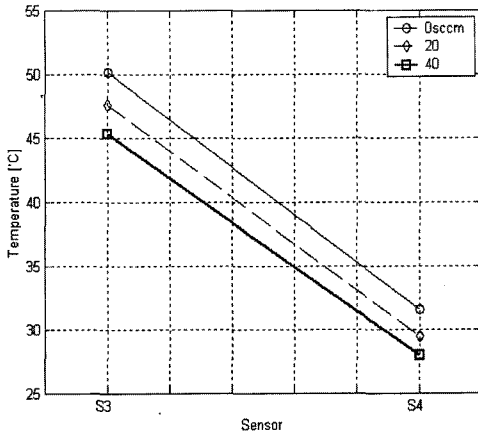


Fig. 7(a) Effect of flow rate

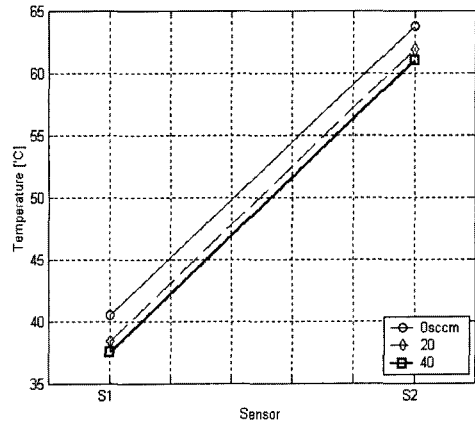


Fig. 7(b) Effect of flow rate

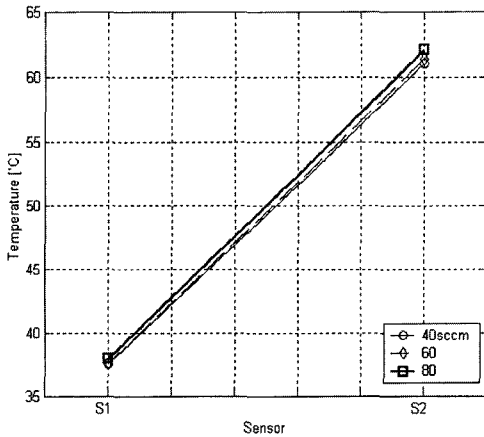


Fig. 7(c) Effect of flow rate

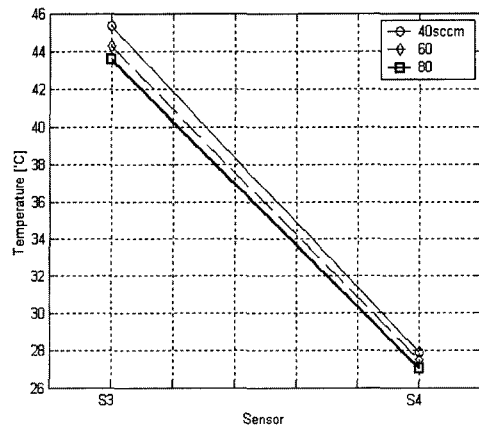


Fig. 7(d) Effect of flow rate

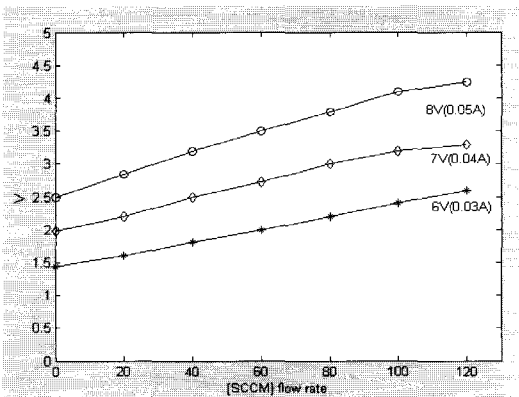


Fig. 8 Relation between sensor voltage and flow rate by way of supplied voltages

4. 동특성

Fig. 9에 질량의 유량을 측정하는 장치를 보이고, Fig. 10은 센서 후단의 신호처리 흐름도이다. Fig. 11은 센서신호를 입력으로 하는 12비트 ADC이다. 센서에서 받은 입력 신호는 고주파성분을 갖는다. 따라서 고주파를 제거하기 위해 아날로그 필터를 Fig. 12와 같이 구현하여 100 Hz 이상의 잡음을 차단하고 ADC에서 입력을 16진수로 읽는다. 1초 이내의 응답시간을 가지고 100SCCM까지의 용량을 갖는 질량 유량 센서의 동특성을 파악하기 위하여 Fig. 13과 같이 유량을 0 SCCM에서 200 SCCM으로 스텝입력을 인가하고 500

Hz로 샘플링하여 시간영역에서 센서의 응답시간을 측정하면 정상상태의 95%에 이르는 시간이 0.8초로서 동특성이 확보되므로 센서로서 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

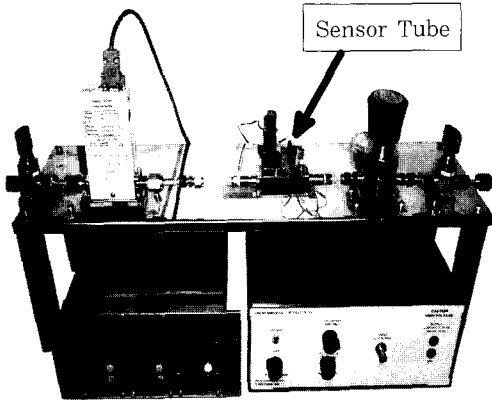


Fig. 9 Measurement of flow rate

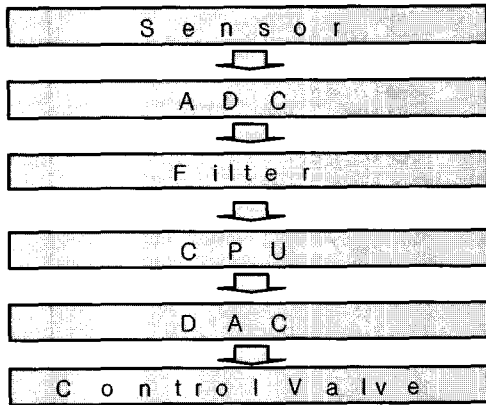


Fig. 10 Flow chart of signal processing

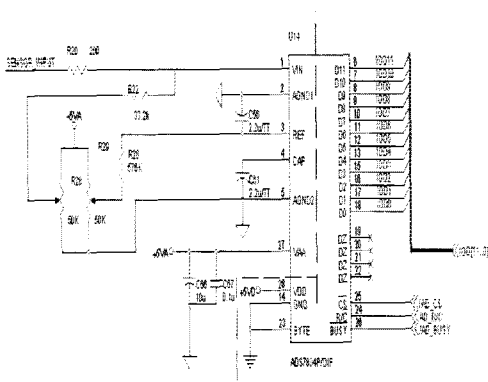


Fig. 11 Analog digital conversion

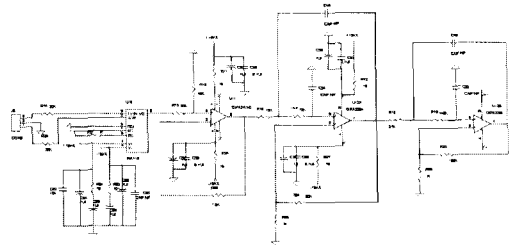


Fig. 12 Low pass filter circuit

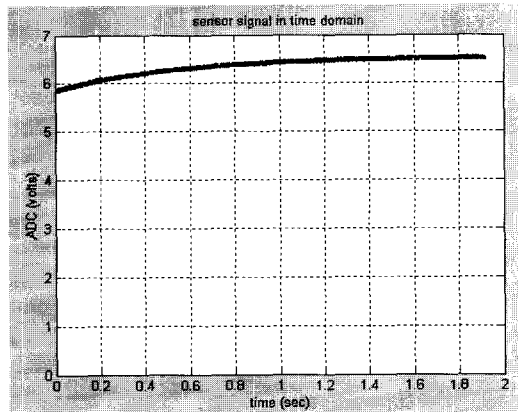


Fig. 13 Response of step input

5. 결 론

가스의 흐름이 없는 튜브 벽에서 전도현상에 기인한 온도구배를 예측하고, 가스의 흐름으로 인한 히터와 가스간의 대류현상이 발생할 때 40 SCCM 이상에서 유량의 증가에 따라 S1과 S2에서 온도가 상승하고 S3과 S4에서는 온도가 하강한다. 본 논문에서 제안한 센서 시스템은 입력인 유량과 출력인 센서전압 사이에 정특성으로 요구되는 1%의 비선형성과 0.6mV에 대응하는 유량을 측정할 수 있는 분해능을 가진다. 또한 0에서 200SCCM의 계단 입력에 대하여 1초 이내의 응답시간 동특성을 확보할 수 있으므로 질량 유량 제어기에의 응용이 기대된다.

참고문헌

[1] J.M. Benson, W.C. Baker, E. Easter, "Thermal mass flow meter," Instr.

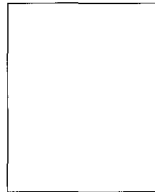
- Control Syst. 43. pp. 85-87, 1970.
- [2] K. Komiya, F. Higuchi, K. Ohtani, "Characteristics of a thermal gas flowmeter," Rev. Sci. Instr. 59 (3,) pp. 477-479, 1988.
- [3] L. D. Hinkle, C.F. Mariano, "Toward understanding the fundamental mechanisms and properties of the thermal mass flow controller," J. Vac. Technol. 9. pp. 2043-2047, 1991.
- [4] P. Rudent, P. Navratil, "Design of a new sensor for mass flow controller using thin film technology based on an analytic thermal model," J. Vac. Sci. Technol. 16, pp. 3559-3563, 1998.
- [5] S. J. Kim, "Experimental and numerical analysis of heat transfer phenomena in a sensor tube of a mass flow controller," Int. Journal of heat and mass transfer 44, pp. 1711-1724, 2001
- [6] 이만형, 메카트로닉스, 사이텍미디어, 2000.
- [7] M. Necati Ozisik, "Basic Heat Transfer," McGraw-Hill Company, 1977.
- [8] Rolf H. Sabersky, "Fluid Flow," Macmillan, 1971.
- [9] S. F. Richard, "Theory and design for mechanical measurements," second ed., Wiley, New York, 1995.
- [10] J. P. Holman, "Heat transfer," seventh ed., McGraw-Hill, New York, 1990.

저 자 소 개



이상경 (李相京)

1957년 9월 5일, 대우정밀 삼성전자 (주)엔파인



김영수 (金永守)

1957년생, 1979년 부산대학교 기계공학과 졸업, 1981년 서울대학교 대학원 기계설계과 졸업(공학석사), 1994년 Concordia대 졸업(공학박사), 현재 부경대학교 기계공학부 냉동공조에너지전공 교수.