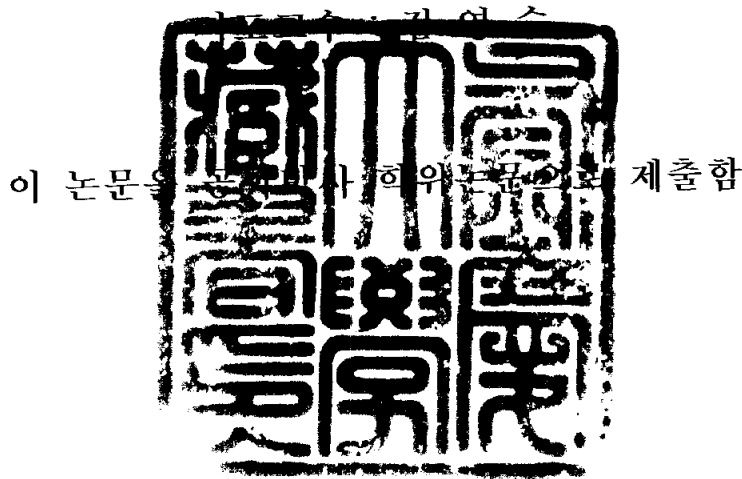


공학박사 학위논문

디스크 압전체를 이용한 비선형 질량 유량 제어기의 특성 연구



2004 년 2 월

부경대학교 대학원

냉동공조공학과

이 상 경

이상경의 공학박사 학위논문을 인준함

2003년 12월

주심

공학박사

오 후 규



부심

공학박사

최 광 환



위원

공학박사

정 석 권



위원

공학박사

박 용 종



위원

공학박사

김 영 수



목 차

Abstract	v
List of Tables	vii
List of Figures	viii
List of Photographs	viii
Nomenclature	xi
제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구의 목적	6
1.3 논문의 구성	8
제 2 장 디스크형 압전체의 특성 해석	9
2.1 압전 특성식	9
2.2 디스크형 압전체의 인가전압과 변위식	12
제 3 장 판스프링 반력과 압력이 작용하는 압전체의 변위 해석 및 실험비교	21
3.1 압전체에 부착된 판스프링 변위의 유한요소 해석	21

3.2 판스프링 반력과 가스압력이 작용하는 압전체의 변위 해석 및 실험 비교 -----	40
제 4 장 질량 유량 센서의 성능 및 영향 인자 -----	45
4.1 온도구배를 이용한 질량유량의 측정-----	45
4.2 실험 장치 구성 및 방법 -----	52
4.3 실험 결과 및 성능 분석 -----	58
4.3.1 전도 실험 -----	58
4.3.2 질량 유량과 응답시간 -----	61
4.3.3 센서튜브 직경변화 실험 -----	64
4.3.4 인가전압별 온도차 실험 -----	67
4.3.5 센서 위치와 유량 실험 -----	69
4.3.6 센서의 성능 -----	71
제 5 장 질량 유량 제어기의 설계 -----	76
5.1 MFC의 모델링 -----	78
5.2 제어기의 설계 -----	82
제 6 장 결 론 -----	86
참고문헌 -----	88
부록 A 시스템 식별을 이용한 모델링-----	94
부록 B 회로도 -----	104

부록 C MATLAB PROGRAM-----	110
감사의 글 -----	118

A Study on Characteristics of Nonlinear Mass Flow Controller Using Disc Piezoelectric Materials

Lee, Sang Kyong

*Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering,
Graduate School, Pukyong National University*

Abstract

A mass flow controllers(MFCs) are widely used in many scientific and engineering process for controlling the mass flow rate of a gas, with an accuracy of 1%. The measurement and control of gas flow rate are critical in many application, such as engine and fuel cell tests, chemical reactions, and so on. A MFC typically consists of an actuator, a sensor and control parts. Piezoelectric materials are used effectively as actuator of MFCs due to their light weight and quick response. A sensor tube with heating wire and thermocouple was used to measure mass flow rates. Control parts send signals from the thermocouple to piezoelectric material. Issues addressed are the effects of spring reaction and pressure on the disk piezoelectric actuator, the relationship between the gap caused by induced voltage in the disk piezoelectric and mass flow rates, investigation of the parameters that affect characteristics of mass flow sensor, DC gain-based modeling useful for the system that has nonlinear characteristics between input and output.

First, the relation between the displacement of the disc piezoelectric material and the electric field was evaluated. In the beginning state without mass flow rate, the reaction force and the displacement of plate spring were derived using FEM(Finite Element Method). These models were further verified by experimental investigation. From the Navier-Stokes

equation and Reynold's equation, the relation between the flow rate and plate gap of disc piezoelectric material was determined. The flow rate of gas was examined experimentally. Finally, the relationship between the electric field and gas flow rate was derived. These results can be used in the design of mass flow controller. Static and dynamic characteristics in the sensor tube of the MFC were studied experimentally. Heat transfer phenomena in the sensor tube are rather complex, because heat generation by the heating wire, conduction in the tube wall, convection throughout the gas, and heat loss through the insulation material are all happening simultaneously. Due to this complexity, many investigators have tried to describe the heat transfer phenomena in the sensor tube with few simplified assumptions. It is unrealistic to expect to find the equations for velocity distribution and energy with accuracy. For that reason, the difference in temperature between inlet and outlet was used for calculating the mass flow rate. Therefore, the relations between flow rate, the heat generated by the heating wire and the sensor location were investigated to determine optimal conditions. Finally, the relationship between sensor voltage through analog digital conversion(ADC), and flow rate in the sensor tube can be represented. Based on this study, the static and dynamic characteristics of sensor tube can be used for the design of mass flow controller. Finally, learning how to control of mass flow controller in gas supplying system was studied. It is difficult to obtain accurate model, because MFC was composed of many parts, and the relationship between input and output of controller is nonlinear. The model for control was obtained by response time and DC gain. Based on this model, PI controller was applied to flow controller using DSP board. This dissertation has addressed modeling of mass flow controller using disc piezoelectric actuators and thermocouple sensors. The results of this dissertation are expected to contribute to control mass flow of gas with an accuracy of 1% in semi-conductors.

List of Tables

Table 1.1 Piezoelectric properties and dimensions

Table 3.1 Displacement of the Nodes

Table 4.1 Dimension of sensor tube

Table 5.1 Voltage of input and output

List of Figures

- Fig. 2.1 Coordinates of piezoelectric material
- Fig. 2.2 Diagram of sputtering machine
- Fig. 2.3 Schematic diagram of piezoelectric valve
- Fig. 2.4 Dimension of piezoelectric material
- Fig. 2.5 Deflection of piezoelectric material
- Fig. 2.6 Comparison between theory and experimental data
- Fig. 3.1 Piezoelectric valve
- Fig. 3.2 Initial dimension of plate spring
- Fig. 3.3 Deformed dimension of plate spring
- Fig. 3.4 1/4 FEM model of plate spring
- Fig. 3.5 Boundary condition of plate spring
- Fig. 3.6 Boundary condition considering symmetry (1/4 FEM model)
- Fig. 3.7 Local coordinates
- Fig. 3.8 Movement of center node in plate spring
- Fig. 3.9 Movement of node attached ring
- Fig. 3.10 Comparison between large deformation and small deformation
- Fig. 3.11 Deformation of plate spring
- Fig. 3.12 Stress distribution of plate spring (Von-Mises stress)
- Fig. 3.13 The effects of spring on the piezoelectric deformation
- Fig. 3.14 Piezoelectric forced by spring and pressure difference
- Fig. 3.15 The effects of spring and pressure on the piezoelectric deformation
- Fig. 3.16 Comparison between theoretical and experimental data
- Fig. 4.1 Schematic diagram of by-pass and sensor tube

- Fig. 4.2 Heat transfer in the sensor tube
- Fig. 4.3 Experimental arrangement
- Fig. 4.4 Dimension of sensor tube in the MFC
- Fig. 4.5 Temperature gradient
- Fig. 4.6 Temperature along the axial direction
- Fig. 4.7 Temperature of each sensor with flow rate
- Fig. 4.8 Response time(tube diameter)
- Fig. 4.9 Response time(tube area)
- Fig. 4.10 Effect of supplied voltage
- Fig. 4.11 Temperature distributions of sensor S1 and S2 versus flow rate
- Fig. 4.12 Temperature distributions of sensor S3 and S4 versus flow rate
- Fig. 4.13 Temperature difference with sensor location
- Fig. 4.14 Relation between sensor voltage and flow rate by way of
supplied voltage
- Fig. 4.15 Flow chart of signal processing
- Fig. 4.16 Response of step input
- Fig. 5.1 Block diagram of MFC
- Fig. 5.2 Nonlinear characteristics between input voltage and flow rate
- Fig. 5.3 Response of step input of actuator and sensor
- Fig. 5.4 Bode plot of $P_D(s)$
- Fig. 5.5 Block diagram of controller
- Fig. 5.6 Sensor voltage for PI control
- Fig. 5.7 DAC voltage for PI control

List of Photographs

- Photo. 2.1 Piezoelectric valve system
- Photo. 2.2 Laser measuring device
- Photo. 3.1 Plate spring attached with ring
- Photo. 3.2 Fixture of reaction force
- Photo. 3.3 Measuring device of reaction force
- Photo. 4.1 Mass flow sensor in the MFC
- Photo. 4.2 Measuring equipment of flow rate

Nomenclature

Symbols

$[c^E]$	: 탄성(elastic stiffness) 계수 행렬	
$[d]$	: 압전 변형(piezoelectric strain) 계수 행렬	
$[D]$	: 전기적 변위(electrical displacement) 행렬	
$[\epsilon^T]$	: 유전(permittivity) 계수 행렬	
$[s^E]$	: 탄성 컴플라이언스(elastic compliance) 계수 행렬	
$[S]$	: 변형률(strain) 행렬	
$[T]$	: 응력(stress) 행렬	
b	: 압전체의 폭	[m]
C_{pf}	: 유체의 정압비열	[J/kg · K]
C_{pt}	: 유체의 정압비열	[J/kg · K]
d_{31}	: 압전변형계수	[C/N]
E	: 압전체의 영률	[N/m ²]
g	: 중력가속도	[m/s ²]
h	: 열전달계수	[W/m ² K]
k	: 열전도도	[W/m · K]
L	: 압전체의 길이	[m]
m	: 질량유량	[kg/s]
P	: 압력	[N/m ²]
Q	: 열량	[W]
S	: 변형률	
SCCM	: 분당 입방 센티미터(standard cubic centimeter per minute)	
t	: 압전체의 두께	[m]
ΔT	: 입 · 출구의 온도차	[K]
ΔT_f	: 입구와 출구에서 유체의 온도차	[K]
ΔT_l	: 입구와 출구에서 센서 튜브의 온도차	[K]
T_{final}	: 센서관 임의의 지점에서 최종온도	[K]
U_{mean}	: 평균속도	[m/s]
U_x, U_y, U_z	: 노드의 변형	[m]

u	: 속도	[m/s]
v	: 비체적	[m ³ /kg]
Nu	: Nusselt number	
Pr	: Prandtl numbe	
Re	: Reynolds numbe	

그리스 문자

ρ	: 밀도	[kg/m ³]
σ	: 응력	[kg/m ³]
η	: 점성계수	[Ns/m ²]

하첨자

$mean$	: 평균
in	: 입구
out	: 출구

제 1 장 서론

1.1 연구의 배경

엔진 실험, 화학 반응 및 반도체 등의 웨이퍼(wafer) 제작공정과 같이 가스 유량의 측정과 제어가 1% 이하의 정밀도를 갖는 과학과 공학 분야에서 가스의 질량 유량을 제어하는 유량 제어기의 기술개발이 요구되어 왔다.⁽¹⁾ 화학 물질의 함량에 따라 반도체의 특성이 결정되므로 반도체의 유량제어용 밸브는 고정밀도를 요구하는 고난도 기술의 제품이다. 반도체 제작공정에서 유량제어기가 응용되는 분야로 확산(diffusion), 화학기상증착(chemical vapor deposition), 에칭(etching), 증착(sputtering) 공정 등이 있다. 증착은 화학이나 열에 의한 방식이 아니고 물리적인 운동량의 교환에 의한 공정이므로 거의 모든 순수금속과 합금이 재료로 사용될 수 있으며 이를 이용하여 금속 막, 절연 막 등을 형성할 수 있다. 최근에 널리 연구되는 리액티브(reactive) 스퍼터링은 챔버(chamber) 내부에 반응가스가 추가로 투입된다. 그러나 스퍼터링 챔버 내부에서 반응가스의 흐름과 침전 속도의 관계는 히스테리시스(hysteresis) 곡선을 가지는 문제점이 있다. 이러한 히스테리시스를 극복하기 위하여 공급되는 가스를 조절할 필요가 생긴다. 이를 조절하기 위하여 질량 유량 제어기(mass flow controller, MFC)가 필요하다. MFC는 구동부, 센서부, 제어부로 구성되어 있다. 가스의 공급을 조절하는 구동부인 밸브의 종류에는 솔레노이드(solenoid)방식, 열팽창(thermal expansion)방식, 압전체(piezoelectric material) 방식 등이 있으며, 솔레노이드방식은 가스 흐름 내부의 자성물체가 부식되고 열 팽창방식은 7초 정도의 늦은 응답시간으

로 인한 단점이 있다. R. Le Letty⁽²⁾는 디젤분사시스템에서 공급되는 가스의 유량 제어의 고정밀화와 고청정화를 위하여 압전체를 이용한 벨브를 연구하였다. 압전체는 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환시키고 그 반대로 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환시키는 전기-기계적 결합 특성이 우수한 물질이다. 이 특성을 이용하여 가진기와 센서로 널리 사용되고 있다. 1950년에서 1960년에 이르러 힘, 변위, 압력 그리고 가속도등의 물리적인 양을 효과적으로 측정할 수 있는 압전체인 PZT(PbZrTiO₃)와 PVDF(poly- vinylidene fluoride)가 개발되었다. 개발 초기에는 압전체의 압전 효과를 이용하여, PZT와 PVDF는 스트레인 게이지(strain gage), 압력 센서(sensor) 및 가속도계 등의 센서 종류와 마이크로 폰에 사용되었다. 또한 주파수 제어나 음향학, 의료진단, 비파괴 검사 등에 사용되어진다. 역으로 전극에 전압을 가하면 인가된 전압의 방향과 양에 따라 기계적인 변위가 일어난다. 이러한 성질을 이용하여 VCR등에 헤드 트래킹(head tracking)에서 정밀 위치 결정 장치에 사용되었다. 압전체는 인장력이나 압축력을 발생시켜 구조물의 진동제어에서 가진기로 사용될 수 있다. 구조물에 가진기로서 적용하는 것은 오랜 기간 간과되어 왔으나 얇은 박판 형태의 압전체를 구조물의 표면에 부착시켜 최근에는 유연구조물의 진동제어에 PZT와 PVDF를 가진기(actuator)로 널리 연구하고 있다. 이 두 종류의 압전체는 가진과 측정이 정밀하게 이루어지고, 질량과 부피가 작고 다양한 모양으로 만들 수 있어서 다루기 쉬우며, 3kHz~5kHz의 충분한 대역폭(band width)을 가진다. 또한 유연구조물과 결부하여 해석이 쉽고, 다른 종류의 가진기와 센서에 비하여 상대적으로 가격이 저렴하다는 장점 때문에 유연구조물의 진동제어에

사용되며 단점으로는 PVDF는 열에 약하고 PZT는 취성이 있다. 1980년에 Forward등은 구조물에 압전소자를 사용하기 시작하여 원통형 기구물에 굽힘 모우드로 인한 피크 응답을 30dB이상 저감시켰다. Bailey와 Hubbard⁽³⁾는 외팔보(cantilever beam) 전체에 PVDF를 부착하여 능동댐퍼로서의 가능성을 개척하였으며 Lyapunov 기법에 의한 진동제어방법을 소개하였다. 또한 경계조건이 다른 보 구조물에 대하여 유사한 연구들이 수행되었다.^(4~8) 압전체를 사용한 평판의 진동제어에 대한 연구도 활발히 진행되었다. Dimitriadis⁽⁹⁾ 및 Clark⁽¹⁰⁾은 압전 가진기에 의한 단순지지(simply-supported) 평판의 진동운동을 이론적으로 분석하고 그것을 실험적으로 확인하였다. Hong⁽¹¹⁾은 고정단 평판(all-clamped plate)에 한 쌍의 압전 가진기와 센서를 동일 위치에 부착하여 진동을 저감시키는 연구를 수행하였다. Dosch등은 페루프계에서 센서와 가진기로써 동시에 사용하는 기술을 개발하였다. 최근에는 압전체를 이용한 소음제거에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.^(12~14) 그러나 이제까지의 연구는 유연구조물과 평판의 진동제어로 사용한 가진기에 국한되어 압전체의 장점을 이용한 다양한 적용 사례는 극히 드물다.

센서부는 MFC에서 가스의 유량을 측정하는 곳이다. 이를 위하여 오리피스, 초음파등과 같은 체적 측정기는 체적 유량이나 속도를 측정하지만 질량유량(mass flow rate)의 정보를 얻기 위하여 부피나 속도를 측정한 후 온도, 압력, 점도 등을 고려하여 질량유량으로 환산하여야 한다. 그러나 MFC는 다른 변수에 대한 보정 없이 직접적으로 질량유량을 측정할 수 있는 장점이 있다. 센서튜브(sensor tube)의 입구와 출구의 온도 차이를 이용하여 가스의 질량을 직접적으로 측정하는 질량 유량 센서 부는

스테인레스(stainless) 튜브에 열선과 센서가 감겨있는 구조이며 MFC에서 가장 핵심적인 역할을 한다. 열선에 의해 가열된 튜브와 센서 튜브 내부의 가스의 흐름사이에 발생하는 열전달 현상에 의해 질량유량이 감지되며, 외부 가스의 흐름이 입구튜브의 온도를 하강시키고 가열된 튜브로부터 전달되는 온도가 상승된 가스의 유량이 출구 튜브의 온도를 상승시킨다. 센서 튜브에 사용하는 열선과 센서의 수량은 다양한 종류가 있으나 반도체 제조와 화학 공정에 최근에 사용되는 센서튜브는 단일 열선과 두개의 센서로 구성되어 있으며⁽²⁰⁾ 이와 같은 열(thermal)식 질량 유량계는 직접 질량유량을 검출하므로 유량계의 구성이 간단해지고 미소 유량의 검출이 용이하며 센서에 필요한 전력이 작다. 또한 유체차이에 의한 보정율(conversion factor)의 관계가 비교적 일정하므로 여러 가지 유체에 대한 대응이 쉽고 가스 접촉 재질이 SUS이므로 부식성이 강한 유체에 사용할 수 있는 장점을 가진다. 센서튜브에서의 열전달은 열선에서 열의 발생, 튜브 벽에서의 전도(conduction), 가스로의 대류(convection)등이 동시에 일어나는 복잡한 현상이다. 이러한 복잡한 현상을 규명하기 위하여 단순한 가정을 전제로 센서튜브에 열전달 현상을 규명하기 위한 많은 연구가 이루어졌다. Komiya⁽²¹⁾는 센서 튜브의 양 끝단의 온도가 질량 유량에 관계없이 일정하고 튜브 벽에서의 온도는 센서 튜브내부에 가스 평균 온도와 같다는 가정 하에 1차원 해석 방법을 제안하고 온도차가 비열(specific heat)과 질량유량의 함수임을 밝혔다. 따라서 이는 튜브 벽의 축 방향에 따른 온도 분포를 나타내는 것으로 제한된다. Hinkle⁽²⁰⁾은 센서튜브에서 유량은 열적이나 유체역학적으로 완전발달 유동(fully developed)되고 전체 센서 튜브에 걸쳐 가스의 흐름과 튜브

벽사이의 경계층에서 너셀(Nusselt) 수는 4.36이라는 가정을 통해 2차원 수치 해를 제시하였고, He, H₂, N₂ 가스에 대한 보정 계수를 향상시키기 위하여 3개의 열전 방식을 제시하였다. 그러나 이러한 가정은 전체 원형 튜브가 균일한 열 유속(heat flux)을 가질 때로 한정된다. Rudent⁽²²⁾는 벽의 온도가 가스의 평균온도와 다른 해석 모델을 이용하여 2차원 해석 해를 제시하고, 센서 선을 TFD(thin film deposition)방법으로 제조하여 응답시간을 향상시켰다. Han은 실험적인 방법으로 센서튜브의 성능을 연구하였으나 소 용량에 국한되어 실질적인 현상을 규명하기에는 제한적이다.

제어기는 센서신호를 입력받고 연산을 수행하여 구동부에 출력한다. 유량의 제어를 수행하기 위하여 정확한 모델을 구해야 한다. 제어를 위하여 해석적인 모델을 이용하는 방법이 연구되어 왔으나, 실제에 적용하기는 매우 힘들고, L. Meirovitch⁽³⁹⁾등이 제안한 유한요소법(FEM: Finite Element Method)등에 의한 방법은 가공오차에 의한 불확실성이나 물성치에 의한 불확실성 때문에 모델의 정확성에 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 유연구조물에 대한 시스템식별(system identification)기법 등이 연구되어왔다.^(41 ~ 45) 그러나 시스템식별기법은 비선형이 존재하는 모델에서는 부적합하다. Jang⁽⁴⁸⁾은 경험적(heuristic) 평가함수를 이용하여 시스템의 특징을 검출하였으나 영상처리에 국한되고, Park⁽⁴⁹⁾은 경험적 분류법을 통하여 스케줄링을 하였고, Hwang⁽⁵⁰⁾은 경험적 규칙을 이용하여 직류서보전동기의 속도제어에 관한 연구를 수행하였으나 경험적 규칙을 위한 다양한 실험이 필요하다.

1.2 연구의 목적

본 논문은 디스크(disc) 압전체를 구동부로 하고 열전대를 센서로 부착하여 MFC를 제어하는 유량제어시스템 전체를 연구하고 실험한다. 선진국에서는 유량제어용 압전체 밸브에 대한 연구를 기초기술로 고부가가치의 반도체 설비를 공급하고 압전체 개발에 수반된 원천 기술을 활용하여 고 정밀 위치제어장치와 같은 고부가 가치 제품 개발하고 있으나 국내에서는 아직 미개척 분야로 남아있다. 또한 최근에 자동화 및 메카트로닉스(mechatronics) 산업에 고정밀, 고성능, 소형, 고감도 센서가 절실히 요구되고 있으나 국내에서는 기반이 미약한 실정이다.

먼저, 사각형 압전체를 외팔보나 평판에 부착시켜 진동을 제어하는 기초 연구는 기존에 많이 수행되었으나 디스크 압전체를 이용하여 가스의 개폐를 하는 구조물에 대한 연구는 일부 선진국에서 수행되어 왔으나 외부에 체계적으로 알려지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 길이에 비하여 두께가 얇은 디스크 압전체에 인가된 전압 대비 변위를 유도하고, 디스크 압전체에 부착된 판스프링의 초기 반력과 변위를 유한요소법으로 구하여 스프링 설계를 위한 모델을 확립하였고, 판스프링의 반력과 가스의 압력이 디스크 압전체에 동시에 작용할 때 압전체의 변위로 인한 틈새와 유량의 관계를 레이놀즈 방정식을 이용하여 유도하였다. 또한 이들을 실험을 통하여 검증함으로써 질량유량제어기에 필요한 입력인 압전체 인가전압과 출력인 질량유량 사이의 모델링으로 사용할 수 있음을 확인하였다.

다음으로, 센서부위는 이제까지의 연구는 열전달 현상을 규명하기 위하여 많은 가정을 도입하여 이론식을 전개함으로써 실제에 적용하기에는 많은 어려움이 있다. 본 논문에서는 질량 흐름 제어기에 사용가능한 센

서튜브의 설계를 위하여 튜브의 열선에 공급되는 전력, 센서의 위치, 열 질량, 가스의 질량 유량 사이의 관계를 실험을 통하여 조사함으로써 센서의 핵심적인 성능인 응답시간(response time)에 대한 실험을 수행하여 센서가 MFC의 전체 응답 중에서 가장 민감한 부품임을 알 수 있다. 센서튜브의 직경, 센서튜브의 온도, 센서튜브 내부의 가스의 유속에 따른 센서의 선형성(linearity)과 센서튜브 내부에서 질량유량의 변동에 따른 감도(sensitivity)를 고찰함으로써 질량유량제어기의 센서튜브로서 사용가능함을 확인하였다.

최종적으로 정확한 모델링이 난이한 MFC 시스템을 제어하기 위하여 DC 이득(gain)과 시정수(time constant)를 이용하여 모델을 구하고, 이 모델을 유량제어에 적용하여 효율성을 입증하였다. 질량유량 제어기에 입력인 인가전압과 출력인 유량사이에 비선형이 존재할 때 실험적인 또 다른 방법인 시스템 식별기법은 적합하지 않음을 확인하였다. 실험을 위하여 디스크 압전체가 고정되는 구조물과 센서로 구성되는 압전체 밸브 및 이 실험들에 사용되는 DSP(Digital Signal Process)보드와 고전압 증폭기 보드도 제작하고 질량유량을 측정하기 위한 장치를 제작한다. 본 논문 연구의 내용을 간략하게 정리하면 압전체에 가해진 전압과 압전체 변위의 관계식을 유도하고 유한 요소법을 통하여 대 변형이 일어나는 판스프링의 변위와 응력에 대한 설계를 하였으며 판스프링과 가스의 압력이 동시에 작용할 때 압전체의 변위와 가스의 유량 모델식을 제안하였다. 또한 센서의 최적조건을 제안하고 이에 따른 센서의 성능 검증하였다. 마지막으로 제어를 위한 모델식을 제안하고 실험 장치와 전기회로보드제작 및 실험을 하였다.

1.3 논문 구성

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2 장에서는 압전체에 대한 특성식을 기술하고, 직경에 비하여 두께가 얇은 디스크 압전체를 모델링하고 인가된 전압과 압전체의 변위의 관계식을 이론으로 제안하고 실험으로 비교하였다. 제 3 장에서는 압전체 디스크에 부착된 판스프링의 구조해석을 수행하고 판스프링으로 인한 반력이 있는 경우에 인가된 전압에 따른 압전체의 변위를 구하였다. 판스프링이 부착된 압전체 디스크에 가스의 압력이 함께 작용할 때 Navier-Stokes 방정식과 레이놀드 방정식으로부터 유량에 대한 모델식을 제안하고 실험치와 비교하였다. 제 4 장에서는 질량유량센서의 위치와 질량 유량과의 관계를 실험을 통하여 조사하여 최적조건을 선정하고 이에 따른 정특성과 동특성을 분석하였다. 제 5 장에서는 DC 이득과 시정수를 이용한 제어 모델 식을 제안하여 PID 제어를 수행하였다. 끝으로 제 6 장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

제 2 장 디스크형 압전체의 특성 해석

압전체는 물리적 변형이 있으면 전압이 발생되고, 그 반대로 전압이 인가되면 물리적 변형이 발생하는 물질이다. 이러한 성질을 이용한 이전의 연구는 외팔보나 평판에 사각형 압전체를 부착하여 진동제어 등에 치중하였으나 본 장에서는 챔버 내부의 가스의 질량을 일정하게 조절하는 것이 필수적인 리액티브 스퍼터링 시스템에서 사용 가능한 MFC의 구동부인 디스크형 압전체에 인가되는 전압과 변위의 관계를 제안하고 실험 치와 비교한다.

2.1 압전 특성식

응력과 전계가 압전체에 인가되면 전기적 변위(electrical displacement)와 변형률은 식(2.1), (2.2)과 같이 주어진다.⁽¹⁵⁾

$$[D] = [\epsilon^T][E] + [d][T] \quad (2.1)$$

$$[S] = [d]^T[E] + [s^E][T] \quad (2.2)$$

여기서 $[D]$ 는 3×1 전기적 변위행렬이고 $[E]$ 는 3×1 전계행렬이고 $[T]$ 는 6×1 응력 행렬이고 $[S]$ 는 6×1 변형률 행렬이다. $[\epsilon^T]$ 는 일정한 응력에서 유전(permittivity)계수 행렬이고 $[d]$ 는 압전변형(piezoelectric strain)계수 행렬이다. $[s^E]$ 는 일정한 전계에서 탄성 컴플라이언스(elastic-compliance)계수 행렬이다. 응력과 전계의 기준 좌표가 Fig. 2.1과 같을 때 $[D]$, $[E]$, $[T]$ 및 $[S]$ 는 다음과 같다.

$$[D] = [D_1 \ D_2 \ D_3]^T$$

$$[E] = [E_1 \ E_2 \ E_3]^T$$

$$[T] = [T_{11} \ T_{22} \ T_{33} \ T_{23} \ T_{31} \ T_{12}]^T$$

$$[S] = [S_{11} \ S_{22} \ S_{33} \ 2S_{23} \ 2S_{31} \ 2S_{12}]^T$$

PZT와 PVDF 압전체는 1과 2방향으로 등방성(transversely isotropic)이므로⁽¹⁶⁾ 각 계수의 행렬은 다음과 같다. 여기서 첫 번째 첨자는 전계의 방향이고, 두 번째 첨자는 변형의 방향이다.

$$[d] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{31} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[\epsilon^T] = \begin{bmatrix} \epsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{22}^T & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33}^T \end{bmatrix}$$

$$[s^E] = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{12}^E & s_{22}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{13}^E & s_{13}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E \end{bmatrix}$$

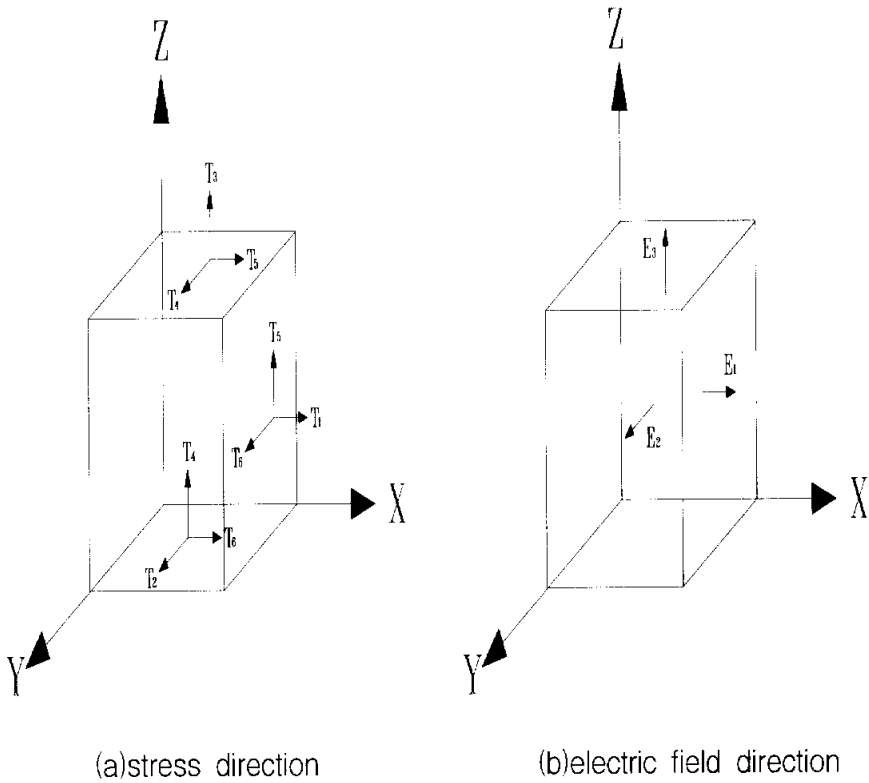


Fig. 2.1 Coordinates of piezoelectric material

또한 (2. 1)과 (2. 2)를 압전체의 변형과 전계에 의한 전기적 변위와 응력으로 나타낼 수 있다.

$$[D] = [\epsilon^S][E] + [e][S] \quad (2.3)$$

$$[T] = -[e]^T[E] + [c^E][S] \quad (2.4)$$

여기서 $[\epsilon^S]$ 는 변형률이 일정한 상태에서 유전계수행렬이고, $[e]$ 는 압전 응력(piezoelectric stress) 계수 행렬이고, $[c^E]$ 는 일정한 전계에서 탄성 계수(elastic stiffness) 행렬이다. 계수 행렬들 사이의 관계는 (2.1)에서 (2.4)까지의 수식들에서 얻어질 수 있다.

$$[c^E] = [s^E]^{-1}$$

$$[e] = [d][c^E]$$

$$[\epsilon^S] = [\epsilon^T] - [d][c^E][d]^T$$

2.2 디스크형 압전체의 인가전압과 변위식

Fig. 2.2는 스퍼터링 시스템을 나타내며 체임버 내부로 주 밸브에서 가스가 공급되고 체임버 내부의 가스의 압력 변동에 따라서 압전체 밸브가 작동된다. Fig. 2.3은 압전체 밸브의 구조를 나타내며 센서부, 제어부, 구동부로 구성되어있다. Photo. 2.1은 압전체 밸브의 내부 사진이다.

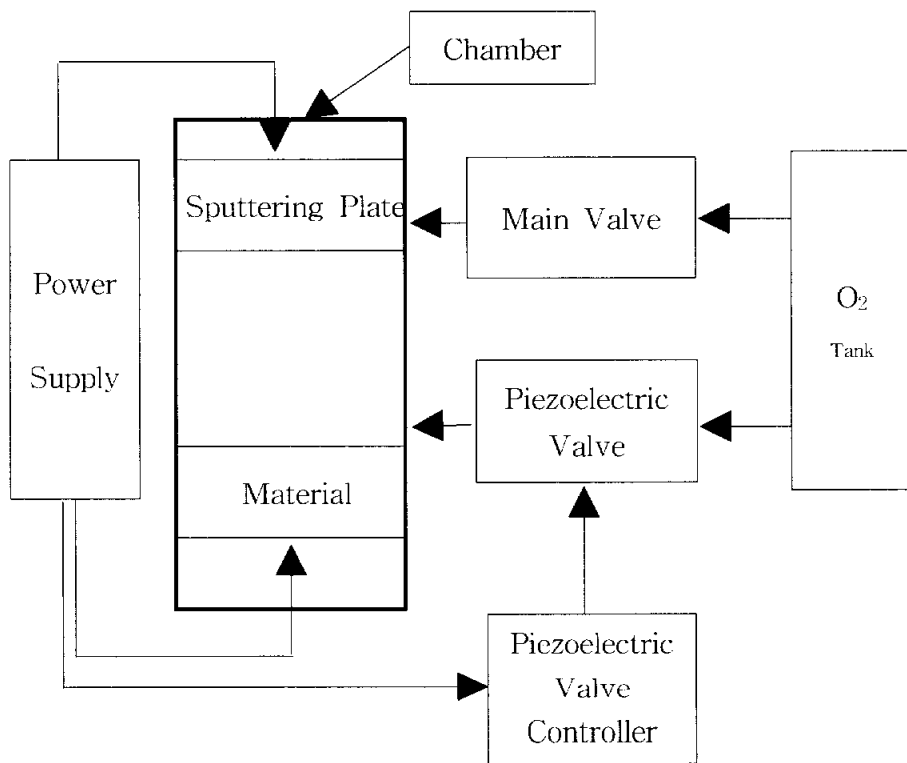


Fig. 2.2 Diagram of sputtering machine

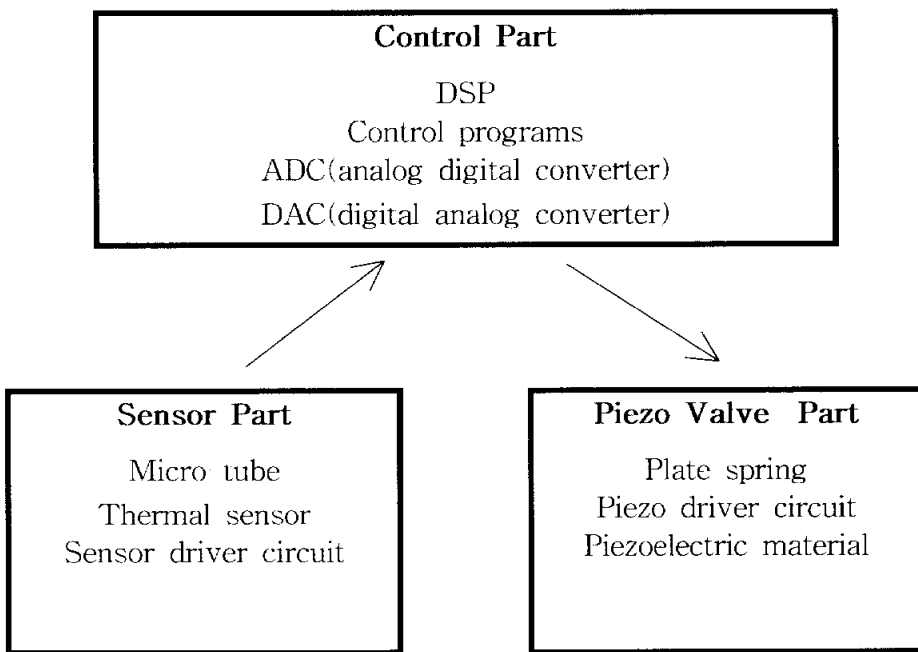


Fig. 2.3 Schematic diagram of piezoelectric valve

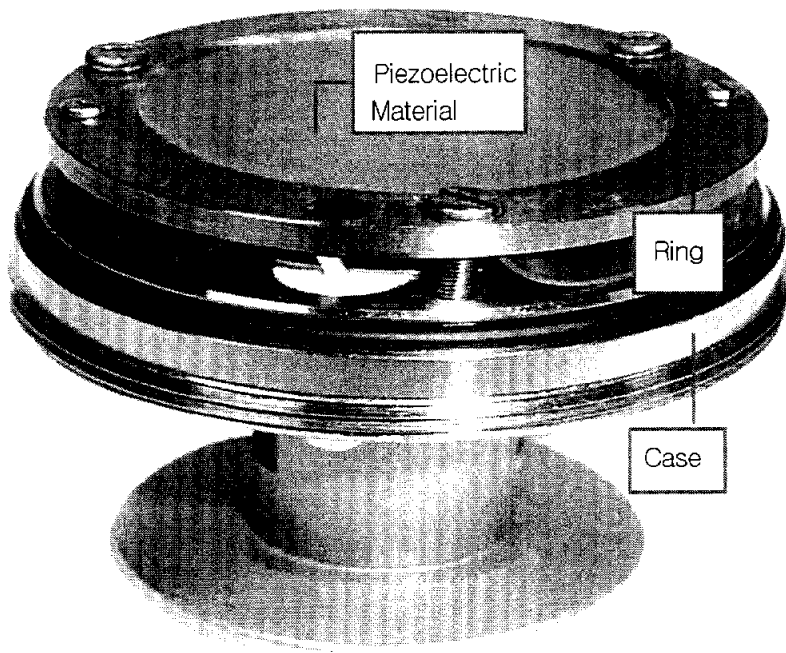


Photo. 2.1 Piezoelectric valve system

직경에 비하여 두께가 얇은 디스크형 압전체는 보로 해석할 수 있으며 디스크형 압전체에 전압을 인가하면 굽힘 모멘트(bending moment)가 발생되어 디스크는 변형이 일어난다. Fig. 2.4와 같이 L 은 압전체의 길이, b 는 폭, t 는 두께이다. 압전체에 전압 V 를 인가하면 압전체에 발생하는 보의 길이 방향의 변형률 S 와 응력 σ 은 식(2.5), (2.6)과 같다.

$$S = \frac{d_{31}}{t} V \quad (2.5)$$

$$\sigma = ES = E \frac{d_{31}}{t} V \quad (2.6)$$

여기서 E 는 압전체의 영률이다. 그러므로 발생하는 힘 F 와 모멘트 $M(x)$ 는 다음과 같다.

$$F = \sigma b \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} M(x) &= 2 \int_0^t F \cdot z dz \\ &= 2 \int_0^t E \frac{d_{31}}{t} V z dz \\ &= d_{31} b t E V \end{aligned} \quad (2.8)$$

한편, Fig. 2.5와 같이 변형이 일어날 때 응력 σ 와 곡률반경의 관계는 다음 식으로 주어진다.

$$\sigma = E \frac{1}{\rho} \frac{t}{2} = \frac{1}{2} E t \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} M(x) &= 2 \int_0^t \frac{1}{2} E t \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} z dz \\ &= \frac{1}{2} b t^3 E \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \end{aligned} \quad (2.10)$$

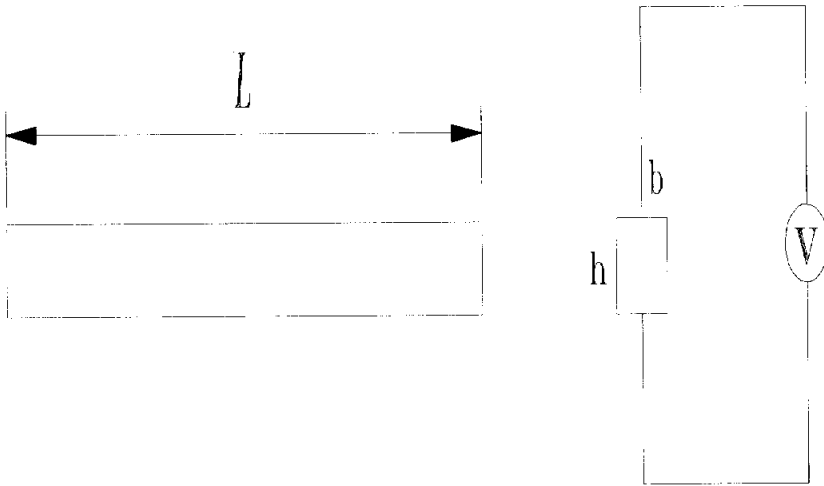


Fig. 2.4 Dimension of piezoelectric material

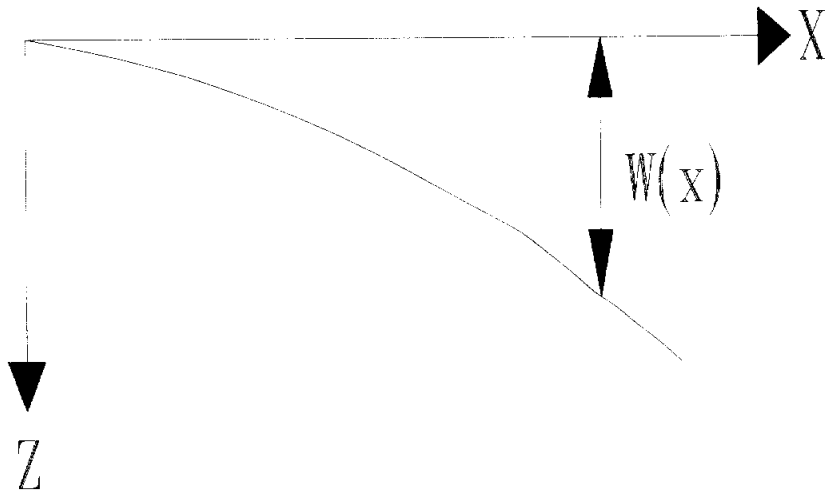


Fig. 2.5 Deflection of piezoelectric material

고정단에서 경계조건은 변위와 기울기가 0이다. 따라서 변위는 식(2.11)과 같다.

$$w(x) = \frac{2}{t^2} d_{31} V x^2 \quad (2.11)$$

그러므로 반경L인 원판의 경우 최대변위는 다음과 같다.

$$w(L) = \frac{2}{t^2} d_{31} L^2 V \quad (2.12)$$

따라서, 변위는 전압에 비례함을 알 수 있고, 본 논문에서 사용한 압전소자의 성질은 Table 1.1과 같다. Photo. 2.2는 실험장치로써 압전체는 피에조(Piezo)사의 디스크 압전체로서 T216-A4NO -373X, 압전체의 파워증폭기는 피에조사 EPA- 104이고 ± 200 볼트의 전압을 공급할 수 있으며, 압전체의 상면과 하면에 납땀을 하여 전선과 파워증폭기를 연결한다. 계측기는 오므론(Omron)사의 파장 650nm, 분해능 2미크론, 측정거리 40mm의 반도체 레이저 측정기 ZX-LD40이고, 결과표시는 ZX-LDA11를 사용하고 센서는 상하조정이 가능한 랙(rack)형태의 치구에 고정한다. Fig. 2.6에 피에조의 전압대비 변위를 이론식과 실험치를 비교하였다. 인가전압에 비례하는 변위가 발생하고 이는 이론 치와 일치한다.

Table 1.1 Piezoelectric properties and dimensions

specification		
d_{31} (C/N)	strain coefficient	190×10^{-12}
t (m)	thickness	0.44×10^{-3}
r (m)	radius	15.9×10^{-3}

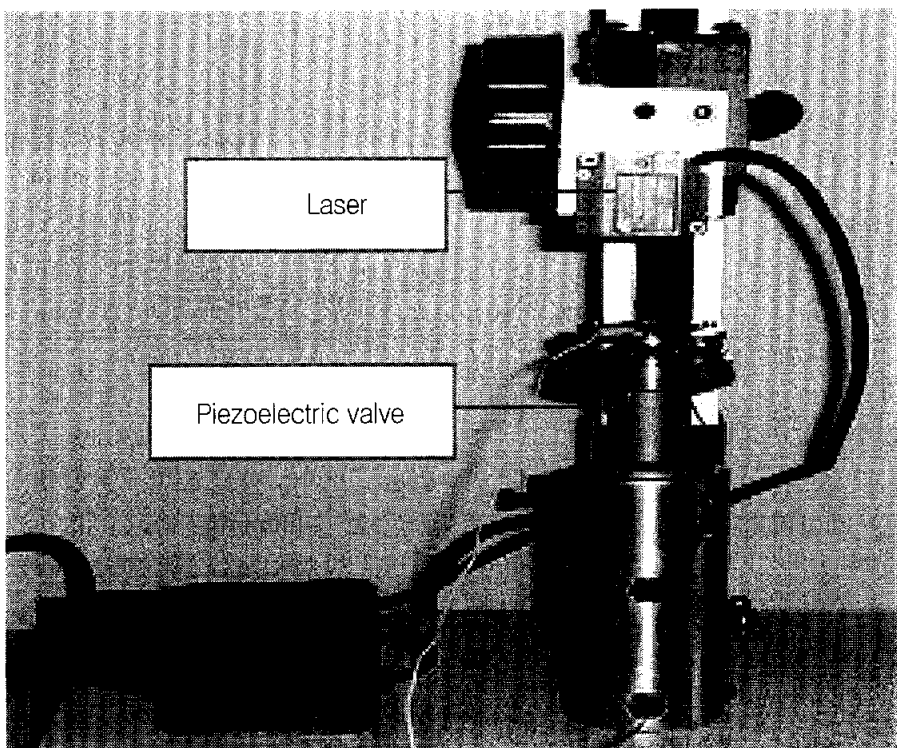


Photo. 2.2 Laser measuring device

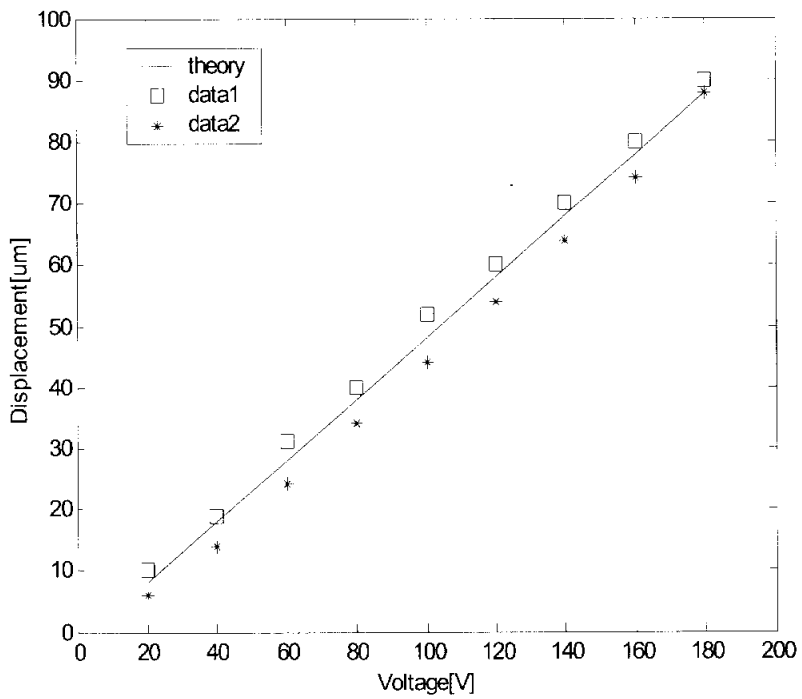


Fig. 2.6 Comparison between theory and experimental data

제 3 장 판스프링 반력과 압력이 작용하는 압전체의 변위해석 및 실험비교

밸브의 초기 기밀 유지를 위하여 부착된 대 변형이 일어나는 판스프링의 변위와 이때 발생하는 변위로 인하여 압전체에 가해지는 반력을 해석하기 위하여 유한요소법을 사용하고, 판스프링이 작용하는 디스크 압전체에 인가된 전압과 압전체의 변위에 대한 상관관계를 제안하고 실험치와 비교한다. 판스프링이 부착된 압전체에 전압이 인가되고 동시에 가스의 압력이 작용할 때 레이놀드 방정식을 이용하여 발생된 틈새와 MFC에서 체임버로 유입되는 질량유량과의 관계식을 제안한다.

3.1 압전체에 부착된 판스프링 변위의 유한요소해석

전압이 인가되기 전의 초기상태에서 기밀의 유지가 필요한 Fig. 3.1과 같은 압전체 밸브에서 판스프링의 정적 변형 특성과 판스프링과 압전체 사이에 작용하는 접촉압력에 대한 연구가 필요하다. 이를 파악하기 위하여 급격한 대 변형이 일어나는 판스프링에 대한 구조 해석을 수행하고 이의 결과를 설계에 반영한다. 밸브의 고정 링에 장착하기 전의 판스프링의 형상은 Fig. 3.2와 같으며 열처리 후 고정 링에 장착하였다. 장착된 판스프링은 Photo. 3.1과 같이 피에조원판에 초기 예압을 주는 구조로 되어 있으며, 장착 후 급격한 형상변화가 유발되므로 장착후의 형상을 3차원 측정기로 측정하였다. 3차원 측정기로 측정된 판스프링의 형상은 Fig. 3.3과 같다. 이상의 측정결과에서도 볼 수 있듯이 판스프링은 급격

한 대 변형이 일어나므로 판스프링에 대한 구조해석을 수행하여 정적변형 특성과 접촉압력 등을 해석하였다. Fig. 3.4는 판스프링의 구조해석을 위한 유한요소 모델로서, 대칭성을 고려하여 1/4모델을 형성하였다. 3-D shell 요소를 사용하였으며 전체 절점(node) 수는 634개이고 요소(element) 수는 570개이다. 해석에 사용한 프로그램은 ANSYS 5.7 상용 프로그램이며, 기하학적 대 변형을 고려한 비선형 유한요소해석을 하였다.

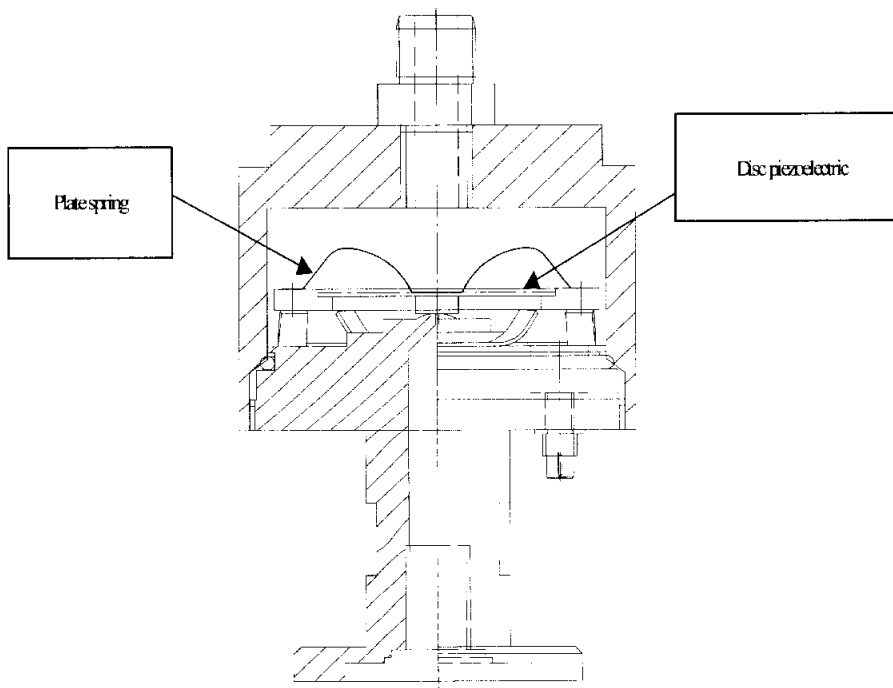


Fig. 3.1 Piezoelectric valve

제 3 장 판스프링 반력과 압력이 작용하는 압전체의 변위해석 및 실험비교

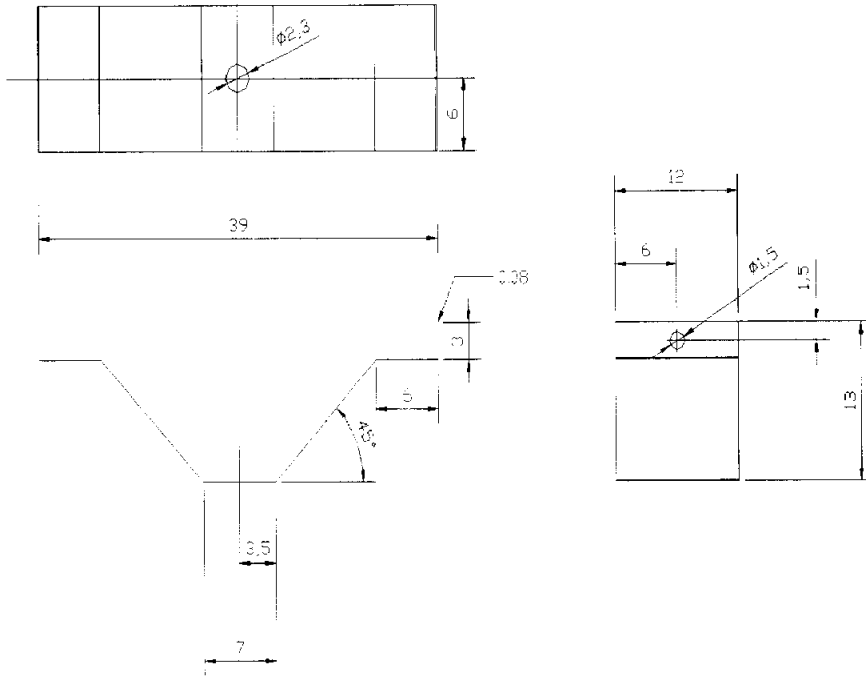


Fig. 3.2 Initial dimension of plate spring

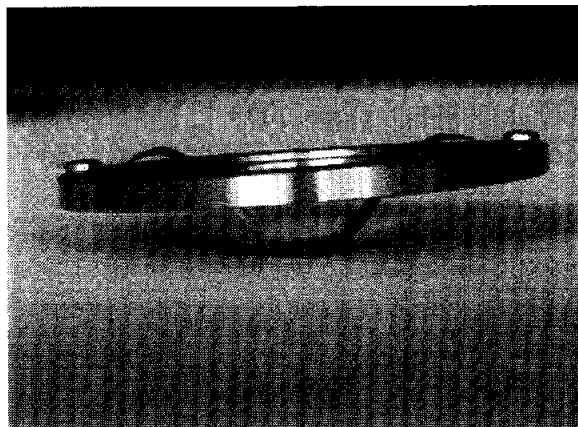


Photo. 3.1 Plate spring attached with ring

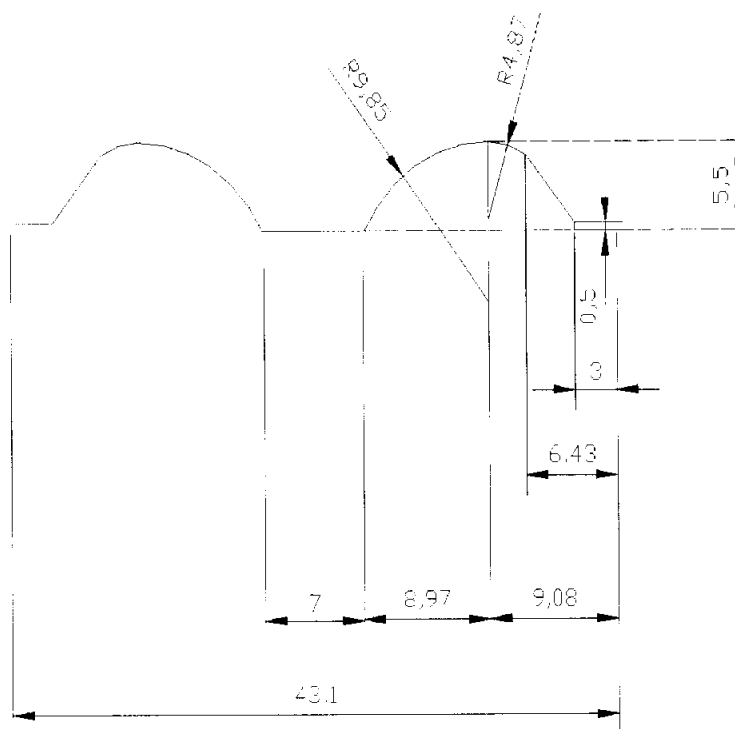


Fig. 3.3 Deformed dimension of plate spring

Fig. 3.5는 판스프링의 1/4모델을 해석하기 위한 경계조건(boundary condition)이다. 현재 모델은 전체 모델에서 4등분된 것이므로 x축 및 y축에 대하여 대칭적인 경계조건을 가져야 한다. 해석에 사용된 요소 종류는 shell 63으로서, 얇은 박막 구조를 가진 모델의 해석에 적합하다. 이 요소는 U_x , U_y , U_z , Rot_x , Rot_y , Rot_z 의 총 6가지 자유도계를 가진다. 그러므로 대칭조건을 적용하기 위해서는 x좌표가 0인 경계면에 있는 절점들에 대하여는 $U_x=0$, $Rot_y=0$ 의 경계조건을 적용하였다. 또한 y좌표가 0인 경계면에 있는 절점들은 y축 방향으로 $U_y=0$, $Rot_x=0$ 로 두어 대칭성을 적용하였다. Fig. 3.6은 이상의 경계조건을 나타내고 있다. Fig. 3.7은 대칭성을 고려한 판스프링의 경계조건을 나타낸 그림으로, x-y평면에 대하여 45° 경사진 면이 존재한다. 이 면에서는 원점을 중심으로 한 전역좌표계의 x축 방향이 평면의 방향과 일치하지 않고 45° 각도로 경사져 있다. 그러므로 이 평면에서의 Rot_x 의 방향은 경사진 평면의 방향과 일치하지 않는다. 따라서 지역좌표계를 경사진 평면위에 평면과 동일한 방향으로 회전시킨 후 생성하여, x축 방향을 경사진 평면의 방향과 일치시켰다.

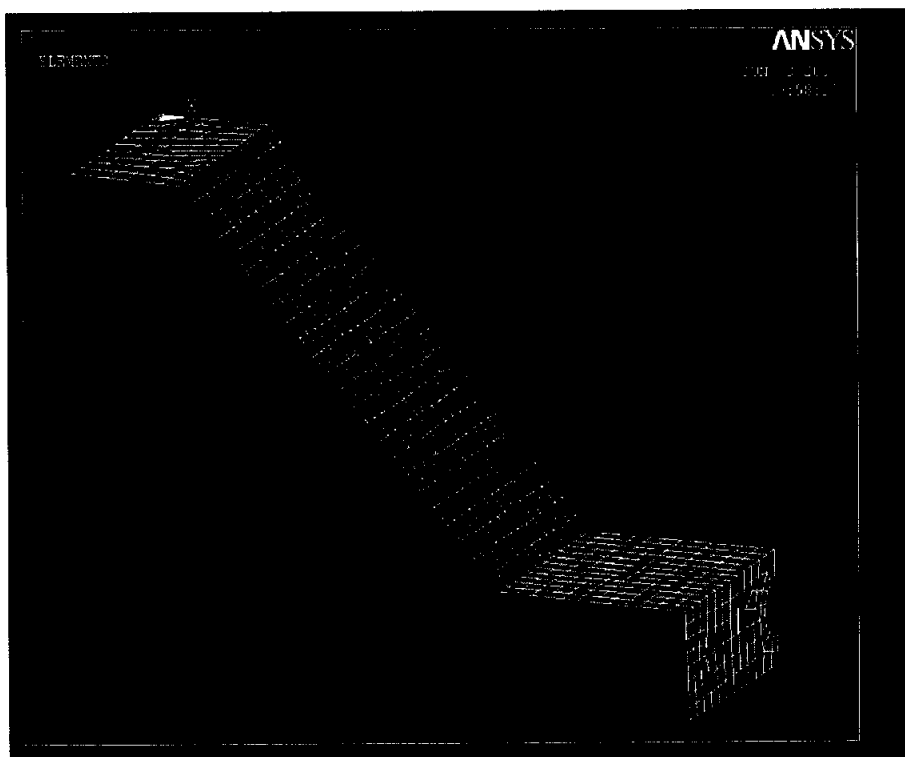


Fig. 3.4 1/4 FEM model of plate spring

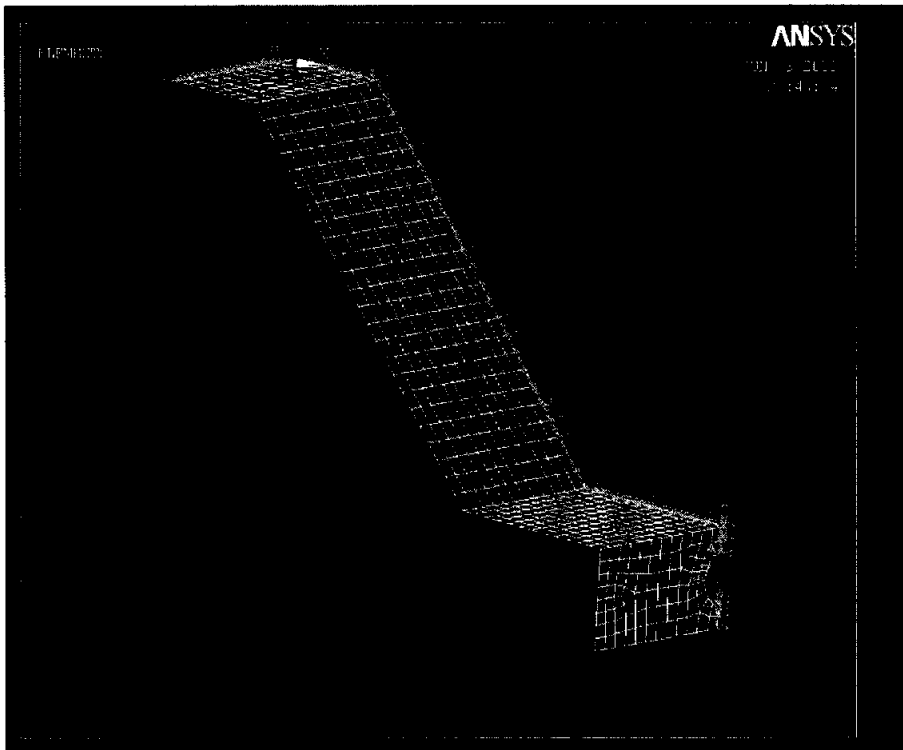


Fig. 3.5 Boundary condition of plate spring

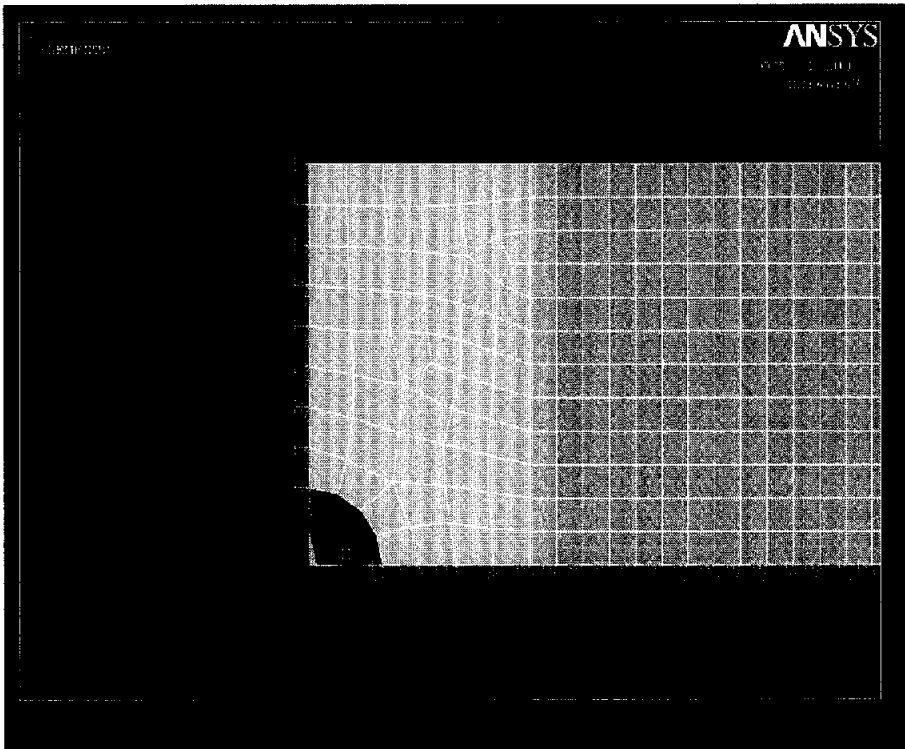


Fig. 3.6 Boundary condition considering symmetry (1/4 FEM model)

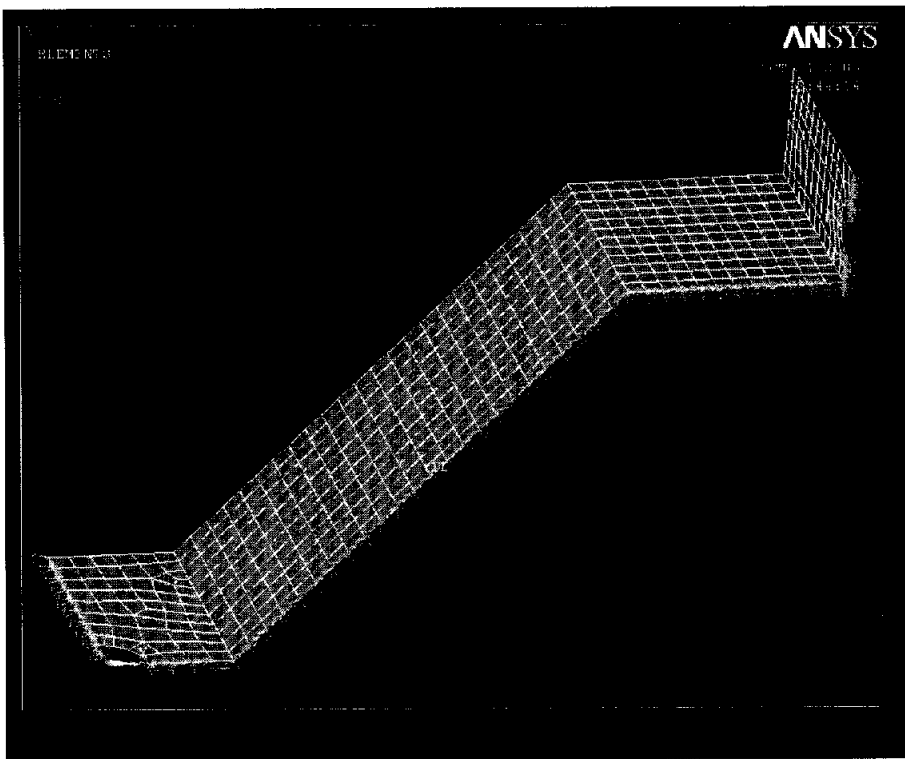


Fig. 3.7 Local coordinates

Fig. 3.2와 Photo. 3.1, Fig. 3.3은 판스프링 형상의 변화를 나타내고 있다. 판스프링 중심부의 변위량은 Fig. 3.3를 참조하여 Photo. 3.1에 나타난 모델로부터 실측하여 얻었으며 그 값은 9.5mm이다. 고정 링에 장착전과 장착 후에 판스프링은 모서리부의 고정 구멍과 중심부근의 위치가 변형이 있으므로 판스프링 말단부분의 좌표 변화는 판스프링 중심부의 변위량과 Fig. 3.2, Fig. 3.3을 대조하여 계산하였다. Table 3.1은 고정 링에 장착되는 판스프링 고정부의 좌표 변위량을 계산하여 나타내었다. Fig. 3.8과 Fig. 3.9에서 보듯이 판스프링 중심부 원공 주변의 한 절점을 Uz 방향으로 9.5mm 이동하였으며, 판스프링의 모서리 부분은 고정 링에 장착되는 원공주변의 세 절점에 Table 3.1에 명시된 변위량을 적용하였다.

Table 3.1 Displacement of the Nodes

Node No.	Ux (m)	Uy (m)	Uz (m)
482	-0.00025	0	-0.00075
488	0.0005	0	-0.0015
484	-0.00125	0	-0.00225

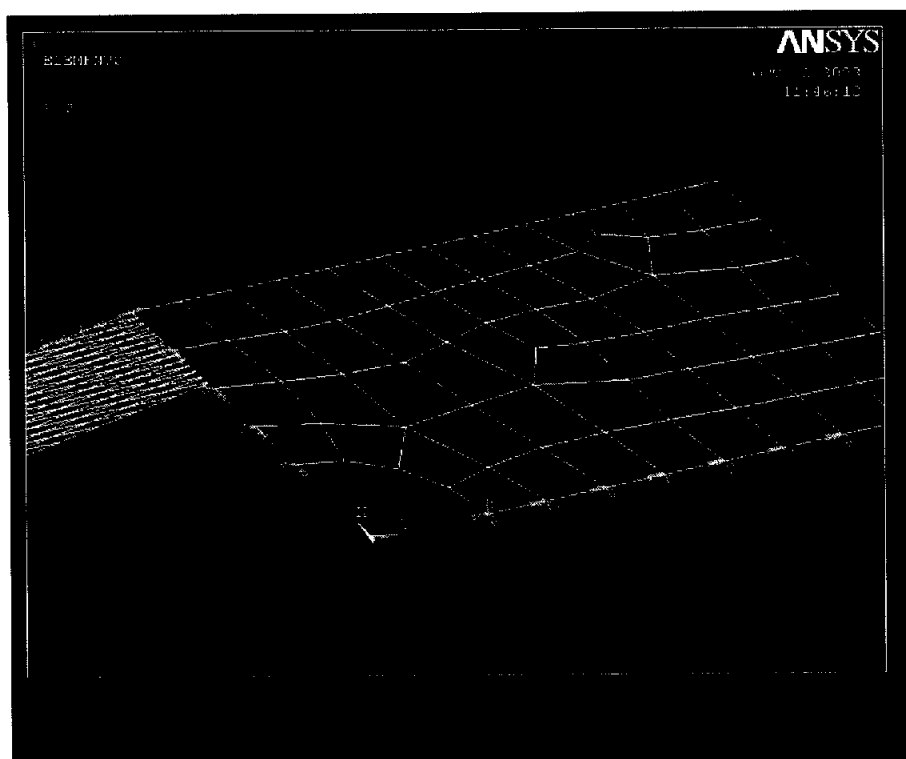


Fig. 3.8 Movement of center node in plate spring

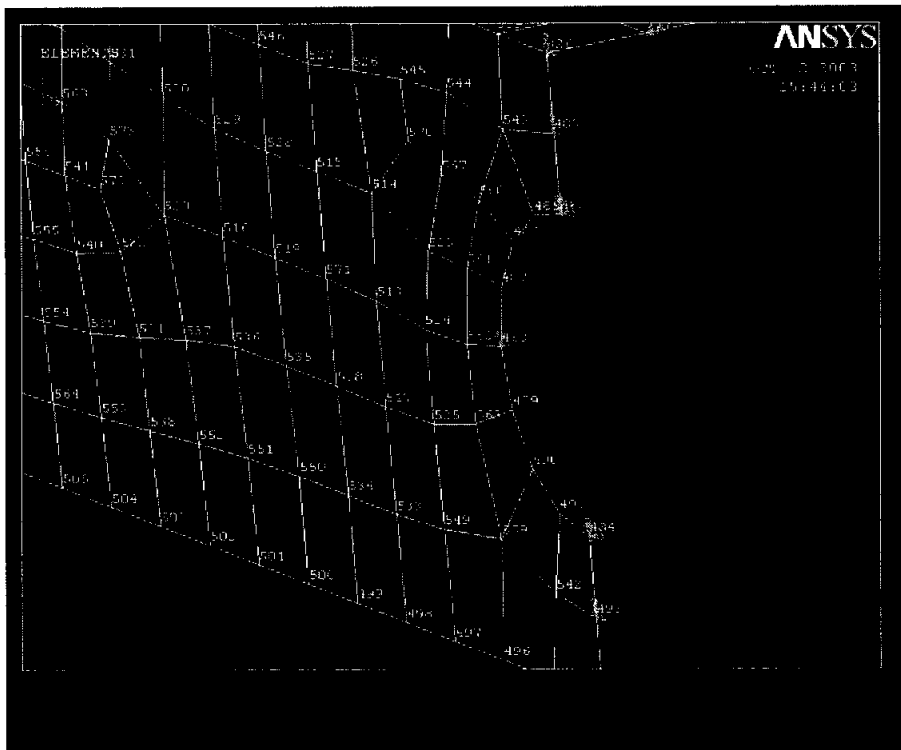


Fig. 3.9 Movement of node attached ring

유한요소해석에서 대 변형이 발생할 때는 초기에 설정하였던 좌표계를 그대로 따라갈 수 없는 경우가 생긴다. Fig. 3.10은 외팔보(cantilever)상태의 빔에 y -방향으로 하중을 작용할 때 기하학적 대 변형을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우를 나타낸 그림으로, 기하학적 대 변형을 고려한 경우는 하중이 가해진 면에 수직으로 하중이 계속해서 작용하고 있음을 볼 수 있다. 본 연구의 판스프링은 대 변형이 발생하는 문제이므로 유한요소해석 시 이를 고려하여야 한다.

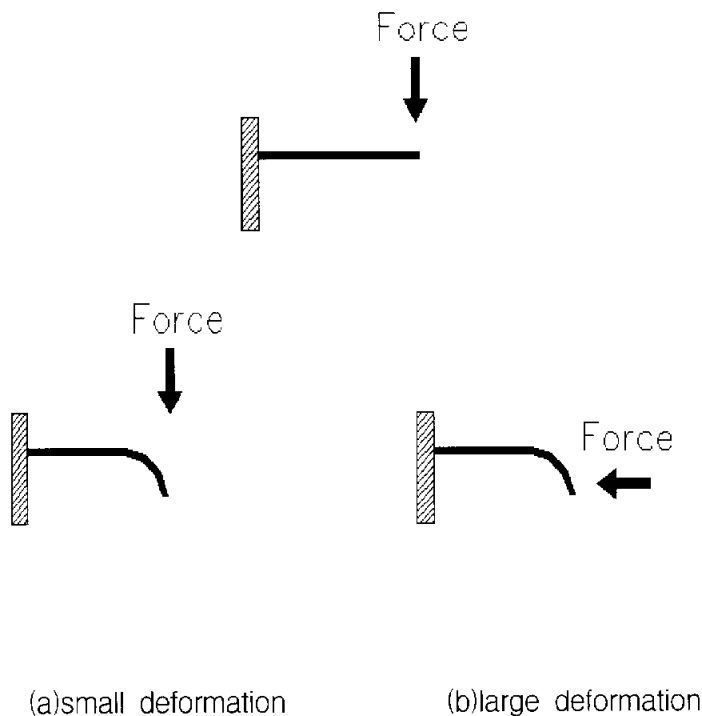


Fig. 3.10 Comparison between large deformation and small deformation

Fig. 3.11은 유한요소해석의 결과를 나타낸 그림으로, 고정 링에 장착된 판스프링의 변형모습을 나타낸 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 판스프링의 변형은 Fig. 3.3에서 측정한 데이터와 유사한 형상을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 피에조 원판과 접촉하는 접촉압력을 평가하기 위하여 판스프링 중심부에 나타나는 반력성분을 계산한 결과, 1.3425N으로 평가되었다. Fig. 3.12는 고정 링에 고정되는 판스프링의 원공 부위를 제외한 판스프링의 응력분포를 Von-Mises 상당응력으로 평가한 그림으로, 국부적으로 과도한 응력이 발생하여 소성변형을 유발할 가능성이 매우 높음을 볼 수 있다. 이상의 해석결과를 검증하기 위하여 Photo. 3.2와 같은 실험 장치를 구성하여 판스프링 중심부의 반력을 측정하였다. 판스프링을 고정 링에 고정하고 피에조 원판과 동일한 높이의 원통형 알루미늄 블록을 가공하여 장착한 다음, 고정 링을 금속 스틱과 마그네틱 척으로 고정하였다. 고정 링의 높이는 두께 게이지(thickness gauge)를 삽입하여 조정하였으며, 정밀저울을 사용하여 원통형 알루미늄 블록에 작용하는 하중을 측정하였다. Photo. 3.3은 판스프링의 중심부 반력을 측정하는 모습을 나타낸 사진으로, 판스프링의 반력은 1.2103N으로 측정되어 유한요소해석과 약 9.8%의 오차를 나타내었다. 압전체와 스프링이 동시에 작용하는 경우에 입력 전압과 압전체 변위의 상관관계는 Fig. 3.13과 같이 변위에 비례하는 판스프링으로 인한 반력이 발생하여 변위가 감소한다.

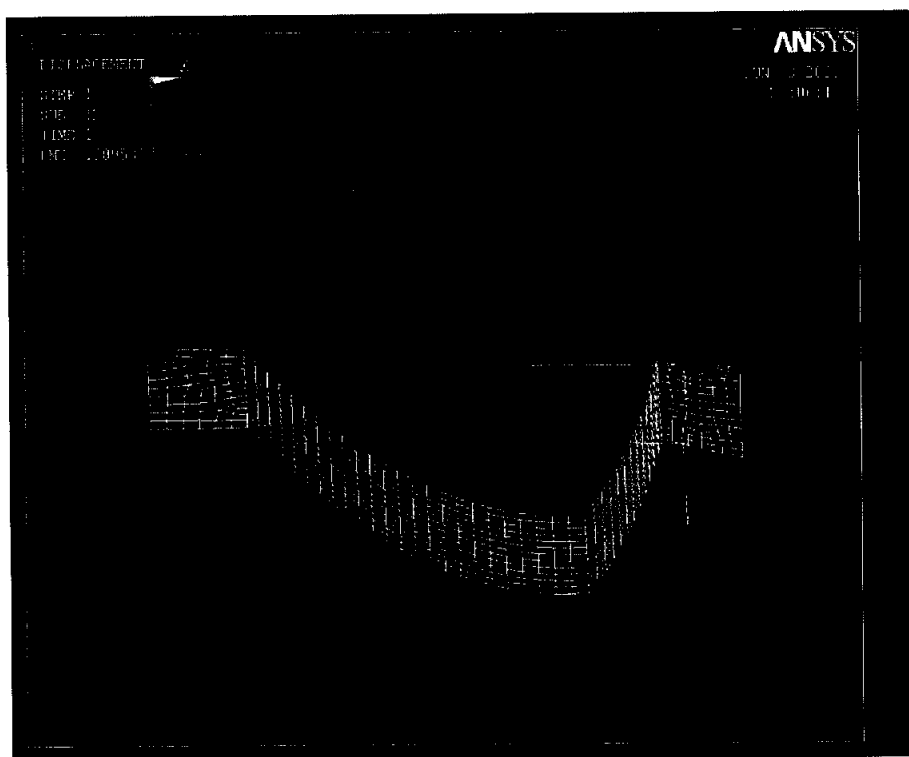


Fig. 3.11 Deformation of plate spring

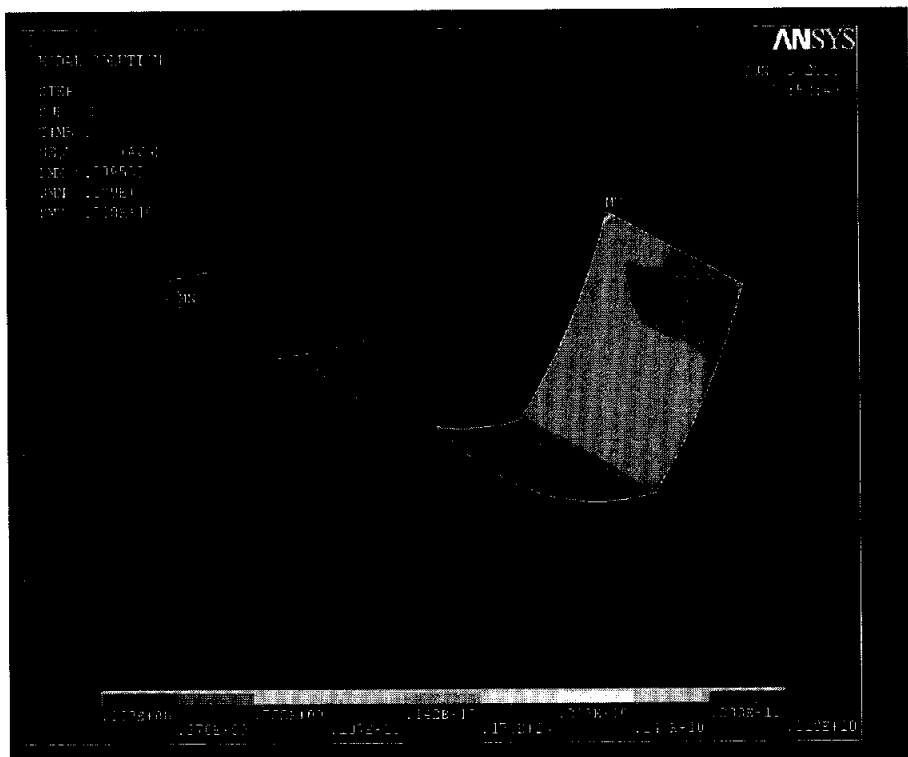


Fig. 3.12 Stress distribution of plate spring(Von-Mises stress)

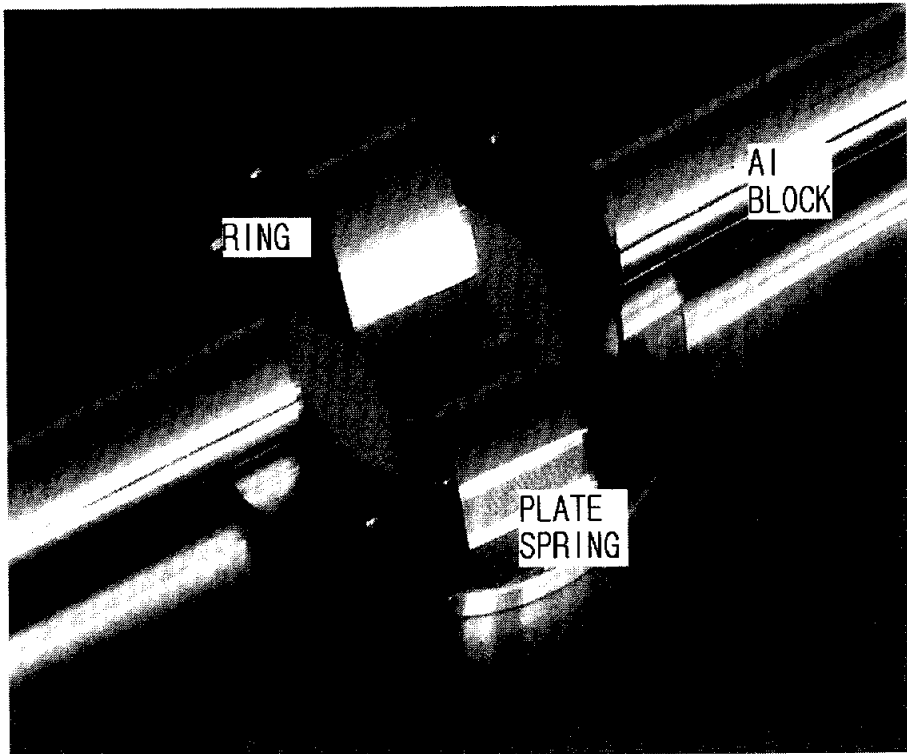


Photo. 3.2 Fixture of reaction force



Photo. 3.3 Measuring device of reaction force

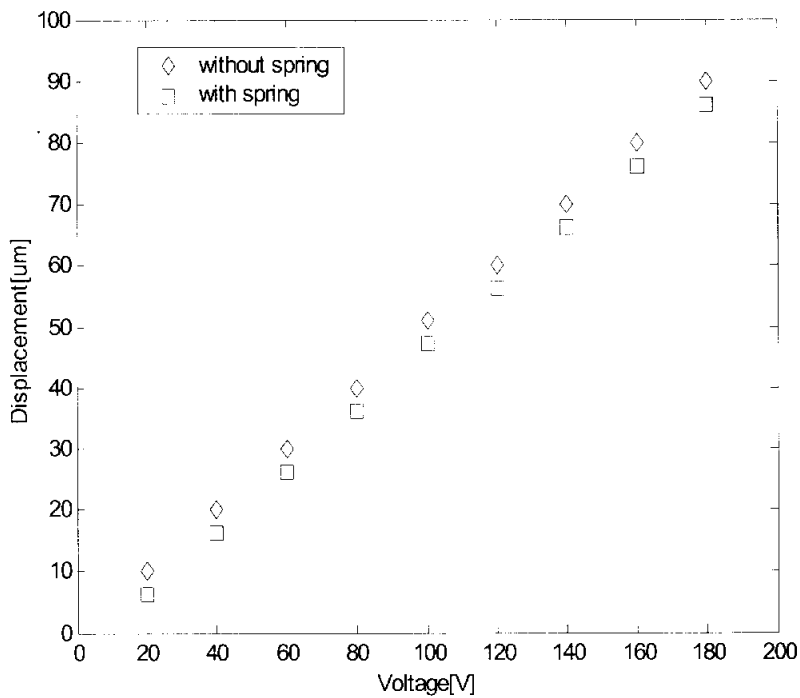


Fig. 3.13 The effects of spring on the piezoelectric deformation

3.2 판스프링 반력과 가스 압력이 작용하는 압전체의 변위 해석 및 실험 비교

Fig. 3.14와 같이 압전체 밸브는 압전체에 인가된 전압에 비례하여 압전체의 변형이 일어나고 이때 생기는 틈새 h 로 가스가 흐르는 구조이다. 초기 기밀유지를 위하여 판스프링이 작용하고 케이스 내에서 압전체의 상하의 압력차이로 인한 힘의 차이 ΔF 가 존재하므로 틈새에서 가스의 압력으로 인하여 압전체에 작용하는 힘이 F_1 은 식(3.1)과 같다.

$$F_1 = \pi [r_o^2 p_o - \frac{1}{2} (p_o - p_i) \frac{r_o^2 - r_i^2}{\ln r_o - \ln r_i}] \quad (3.1)$$

상부에서 압전체에 작용하는 힘이 F_2 는 식(3.2)와 같다.

$$F_2 = \pi r_o^2 p_o \quad (3.2)$$

압전체에 작용하는 힘의 차이는 식(3.3)과 같다.

$$\Delta F = F_2 - F_1 = \frac{1}{2} (p_o - p_i) \frac{r_o^2 - r_i^2}{\ln r_o - \ln r_i} \quad (3.3)$$

실험에 사용한 것은 $r_o = 31.8\text{mm}$, $r_i = 0.5\text{mm}$ 이며, $p_o - p_i = 2.5 \times 10^5$ [Pa]이므로 판스프링과 압력차가 동시에 작용할 때에 가로축에 인가전압을 세로축에 압전체의 변위를 구하고, 스프링의 영향을 동시에 Fig. 3.15에 나타내었다. 판스프링이 부착된 경우 반력으로 인하여 변위가 작게 발생되고 가스 압이 디스크 압전체의 상면과 하면에 작용할 때는 140 볼트 이상에서 변위가 발생한다. Fig. 3.14와 같이 정지한 2개의 평행평판 사이에서의 속도분포는 Navier-Stokes 방정식으로부터 식(3.4)와 같이 구해진다.

$$\frac{d^2 u}{dz^2} = \frac{1}{\eta} \frac{dp}{dx} \quad (3.4)$$

식(3.4)에 경계조건을 적용하면 속도는 식(3.5)와 같다.

$$u = \frac{1}{2\eta} \frac{dp}{dx} (z^2 - hz) \quad (3.5)$$

또한 레이놀즈 방정식으로부터 압력의 분포는 식(3.6)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\rho r h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) = 0 \quad (3.6)$$

식(3.6)에 경계조건을 적용하면 식(3.7)과 같다.

$$p = p_o + (p_o - p_i) \frac{\ln r - \ln r_o}{\ln r_o - \ln r_i} \quad (3.7)$$

틈새에서의 속도분포는 식(3.8)과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dr} &= \frac{1}{r} \frac{p_o - p_i}{\ln r_o - \ln r_i} \quad \text{이므로} \\ u &= \frac{p_o - p_i}{2\eta r (\ln r_o - \ln r_i)} (z^2 - hz) \end{aligned} \quad (3.8)$$

그러므로 유량은 틈새 h 의 3승에 비례한다.

$$q = \int_0^h u dA = \frac{\pi h^3 (p_o - p_i)}{6\eta (\ln r_o - \ln r_i)} \quad (3.9)$$

Fig. 3.16에 틈새를 흐르는 질량 유량의 이론 치와 실험치를 나타내었으며 η 는 상온에서 질소의 점성계수로서 $17.9 \times 10^{-6} [\text{Pa} \cdot \text{s}]$ 이다. 판스프링이 부착되고 압전체의 상하부에 기압 차이가 있으면 인가전압이 140볼트 이상일 때 틈새가 발생하며 틈새의 3승에 비례하는 질량유량이 발생하는 것을 알 수 있다.

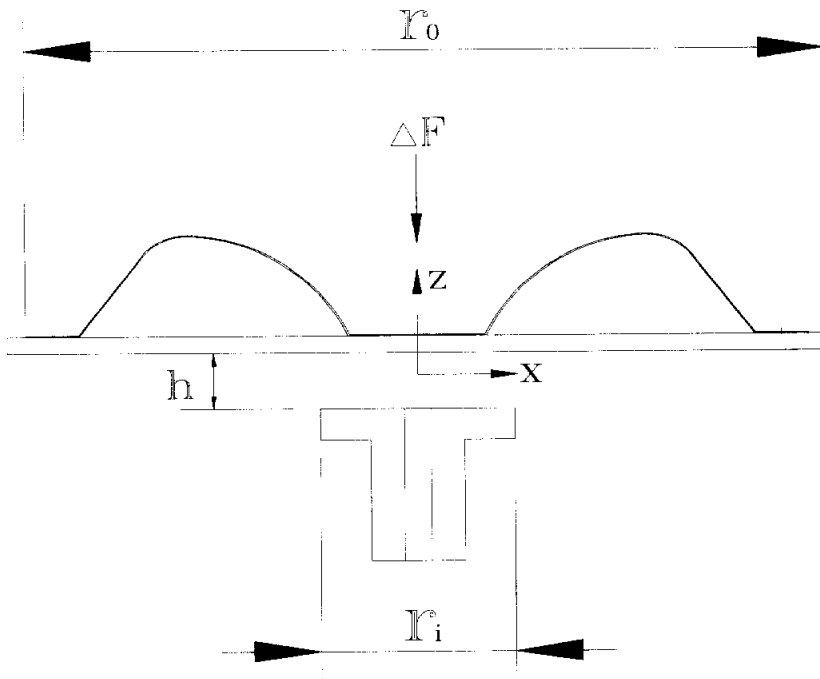


Fig. 3.14 Piezoelectric forced by spring and pressure difference

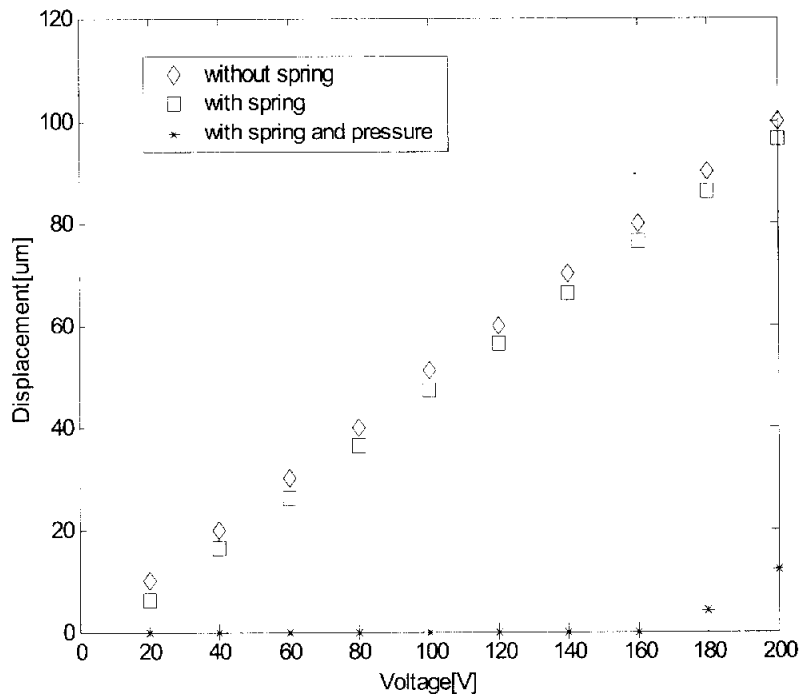


Fig. 3.15 The effects of spring and pressure on the piezoelectric deformation

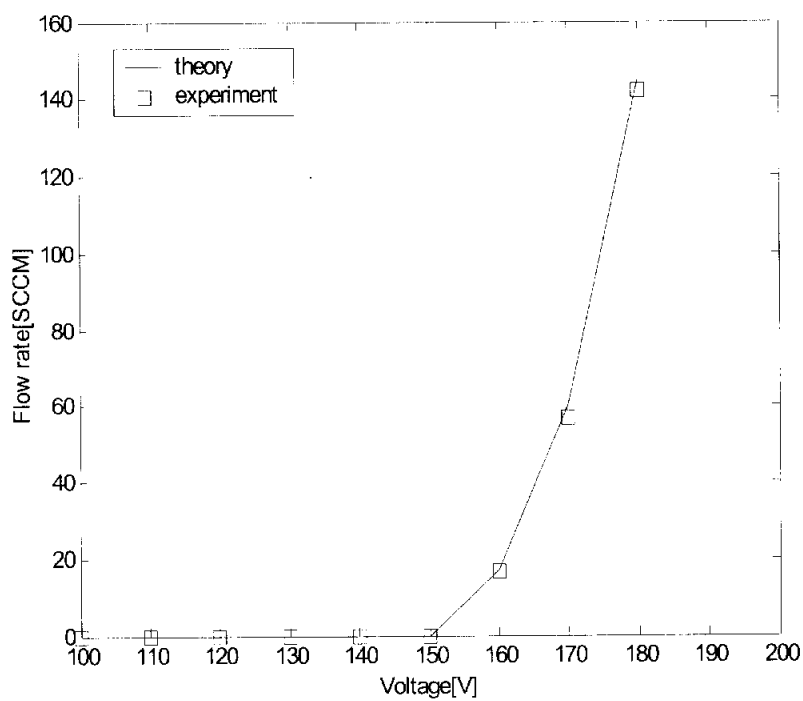


Fig. 3.16 Comparison between theoretical and experimental data

제 4 장 질량유량센서의 성능 및 영향 인자

질량유량센서는 가스의 유량을 측정하여 ADC를 거쳐 제어기에 전달하는 역할을 함으로써 MFC 전체의 성능을 좌우한다. 센서튜브의 내부에 층류가 흐르는 외경에 열선과 센서를 부착된 센서튜브의 열전달 현상을 규명하기 위하여 기존 이론은 많은 가정을 포함하여 방정식의 해를 구하였으나, 본 연구는 센서튜브의 입구와 출구의 온도차를 측정함으로써 질량유량을 측정한다. 질량유량과 센서튜브의 열 질량, 센서의 위치, 인가전압, 튜브의 열 질량(thermal mass)에 관한 실험을 통하여 센서의 정특성과 동특성을 고찰한다.

4.1 온도구배를 이용한 질량유량의 측정

센서튜브의 내경은 체임버에 공급되는 전체 유량에 필요한 내경과 비교하여 1/10~1/15정도이므로 내부를 흐르는 유량에는 한계가 있다. 따라서 그 이상의 유량을 측정하기 위하여 Fig. 4.1과 같이 센서 튜브와 병렬로 배치된 별도의 통로를 갖추어야 한다. 이러한 별도의 통로를 바이패스(by-pass)라고 하며 바이패스 안에는 분배기(restrictor)가 있어서 유량을 센서튜브와 바이패스 부위로 일정한 비율로 나누어 주는 역할을 한다. 질량유량센서의 외관은 Photo. 4.1과 같으며 질량유량센서 내부의 센서튜브는 가늘고 긴 스테인레스 튜브로 제작되고 전체 외경은 대략 0.2mm~1.2mm이다. 또한 질량유량센서는 센서 튜브에 열을 가하기 위한 열선과 온도를 측정하기 위한 센서 선으로 구성된다. 열선과 센서 선을 센서 튜브에 고정하는 방법에는 두 가지 방식이 있다. 첫 번째는 한

개의 열선과 두 개의 센서 방식으로 열선이 센서 중앙에 감겨져 있으며, 센서 선은 열선을 중심으로 센서 튜브의 입구와 출구에 대칭적으로 감겨져 있다. 두 번째로는 두 개의 열선과 두 개의 센서 방식으로 센서선이 입구와 출구에 배치되어 열선과 센서 역할을 동시에 수행하는 방식이다. 반도체 공정에서 대부분 사용하고 있는 방식은 한 개의 열선과 두개의 센서 방식이다. 센서 튜브 내부에 유체가 흐르지 않을 때 열선에 전원을 인가하면 그 열로 인하여 센서 튜브 표면은 대칭적인 온도 분포를 형성하게 된다. Fig. 4.2와 같이 열선에 의한 열 발생이 있을 때 센서 튜브 자체에서는 전도가 일어나고 센서 외벽으로 열손실이 발생한다. 유체가 센서 튜브에 유입이 되면 대류에 의하여 센서 튜브의 온도분포는 입구에서는 온도가 내려가고 출구에서는 온도가 올라가므로 입구와 출구는 비대칭적인 온도분포를 형성하게 된다. 이때 생기는 입구와 출구의 온도차를 센서 선에서 검출하여 질량유량을 측정하게 된다.

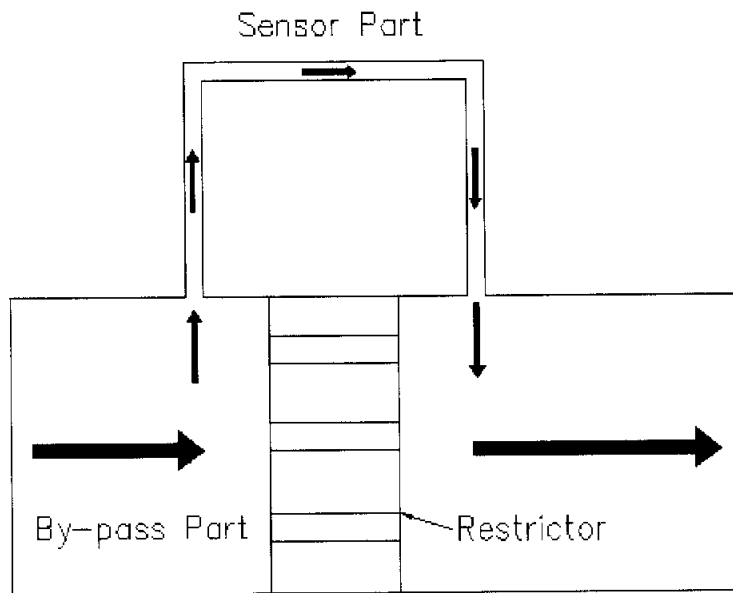


Fig. 4.1 Schematic diagram of by-pass and sensor tube

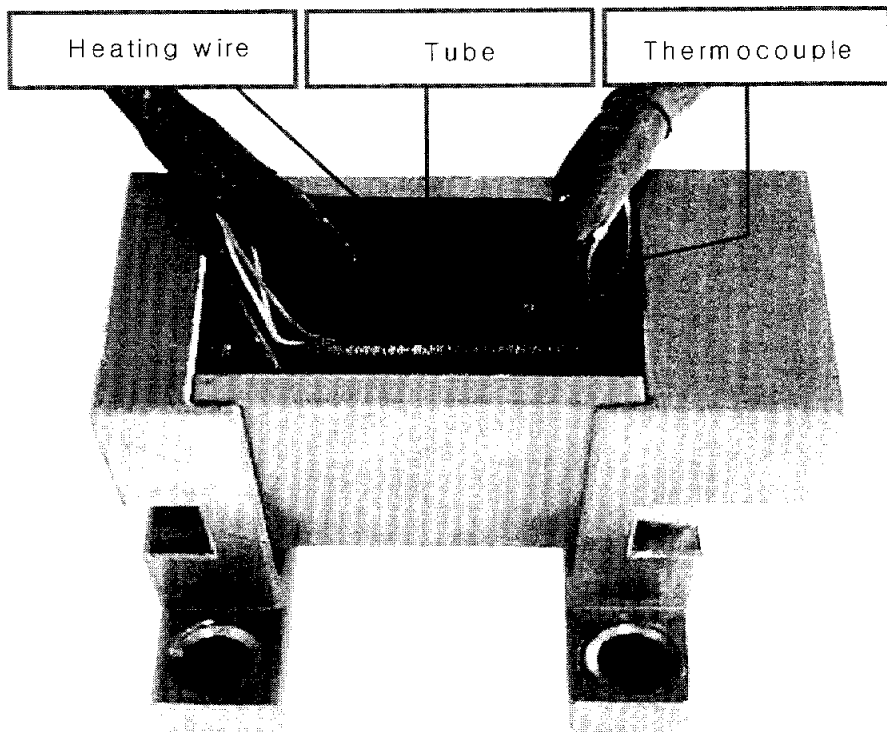


Photo. 4.1 Mass flow sensor in the MFC

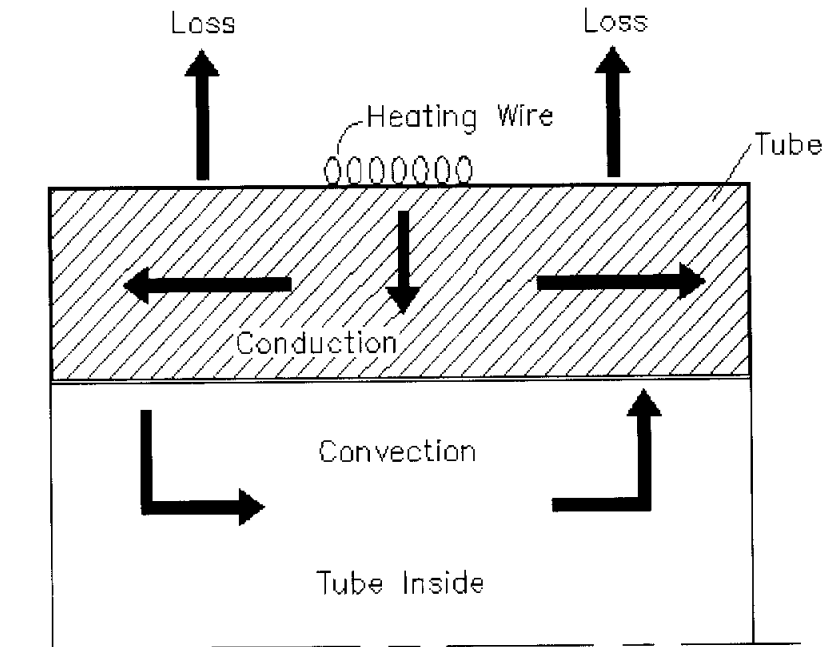


Fig. 4.2 Heat transfer in the sensor tube

MFC의 센서 튜브에서 가스 유동과 열전달 현상을 해석하기 위하여 튜브의 벽과 가스의 흐름에 대하여 연속(continuity), 모멘텀(momentum), 에너지(energy) 방정식을 풀어야 한다. 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r V_r) + \frac{\partial}{\partial x} (V_x) = 0 \quad (4.1)$$

여기서 r 은 튜브의 내경, x 는 튜브의 길이이고, V_r 과 V_x 는 반경방향과 길이방향의 유체 속도이다. 0.8mm의 튜브에 300cm³/min[standard cubic centimeter per minutes, SCCM]으로 질소가 흐를 때 레이놀드 수 (Reynolds number)는 식(4.2)에서 구해진다.

$$Re_D = \frac{U_{mean} D_{in}}{\eta} = 502 \quad (4.2)$$

이는 층류로 가정할 수 있다. U_{mean} , D_{in} , η 는 평균속도, 센서 튜브의 내경, 질소가스의 점성계수이다. 이때 튜브 내의 속도 분포는 다음과 같다.

$$u = 2U_{mean} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (4.3)$$

여기서 R 은 튜브외경, r 은 튜브내경이다.

모멘텀 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\mu}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{du}{dr} \right) = \frac{dp}{dx} \quad (4.4)$$

여기서 μ , u , p 는 점성계수, 축 방향 속도, 압력이다. 또한 에너지 방정식은 다음과 같다.

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

여기서 x 는 튜브의 길이이다. 연속, 모멘텀, 에너지 식의 해를 구하기 위

해서는 경계조건에 많은 가정이 포함되어야 하므로 정확성을 기하기 어렵다. 이를 해결하기 위하여 본 연구에서는 가스가 흐르는 금속 튜브의 주위에 감겨진 열선으로 가열할 때 튜브의 입구와 출구에서 온도차가 발생하고 가스의 유속이 빨라지면 온도차도 증가하므로 다음의 식에서 가스의 질량을 구하는 방법을 이용한다.

$$m = \frac{Q}{c_p \Delta T} \quad (4.5)$$

여기서 m 은 질량유량, Q 는 열량, c_p 는 비열, ΔT 는 입출구의 온도차이다. 실험의 목적은 MFC에 사용 가능한 선형성, 분해능, 빠른 응답시간 등의 센서 성능이 확보되는 안정적인 ΔT 를 구현하는 것이며, ΔT 는 ADC를 거친 후 신호의 크기로 바뀌게 되며 안정적인 신호가 확보되면 외부로부터 들어오는 잡음으로 인한 신호의 왜곡에 대하여 강인하게 된다. 선형성은 유량과 온도차 간의 관계가 얼마나 선형적인가를 나타낸다. 비선형적인 관계는 보정을 해서 사용해야 하므로 유량의 정확한 측정을 어렵게 한다. 응답시간은 센서 튜브 내에 유동이 발생한 순간부터 센서 튜브가 열적으로 평형상태에 이르는 데 걸리는 시간이다. 열적으로 평형을 이룬다는 말은 열선에서 발생하는 열량이 센서튜브에서 벽면을 따라 전도되는 열량, 센서 튜브내부에서 대류에 의한 열량, 외부로 열이 빠져 나가는 열손실량 등의 경로를 통하여 열이 전달되고 센서튜브의 온도가 시간에 따라 변하지 않는 것을 의미한다. 열원, 전도, 대류, 열손실등의 복잡한 열전달 현상에 의해 센서 튜브가 열적 평형을 이루는 데는 시간이 소요된다. 응답시간이 빠르다는 의미는 현재에 흐르고 있는 유량을 나타냄에 있어 시간의 지연이 얼마나 작은가로 나타낸다고 말할 수 있다. MFC 센서튜브의 응답시간은 대부분 10초에서 60초 사이가 되며

MFC의 연구에 가장 핵심이 된다. 센서성능에 영향을 미치는 인자로는 센서튜브의 직경, 열량, 질량유량(mass flow rate) 등이 있다. 각 인자 변화에 따른 센서 성능 변화를 알아보기 위하여 센서튜브의 내부 직경이 0.3mm, 0.5mm, 0.6mm, 0.8mm를 비교하여 실험을 하였다. 열량은 인가 전압과 전류에 의한 전력, 열선의 길이에 의해 결정되며 열선의 길이를 고정하고 인가 전력을 변동하여 비교하면 센서튜브의 중앙온도를 변화시킬 때 튜브에 가해지는 열량에 비례하여 변화시키는 효과를 지닐 수 있다. 센서 튜브 내에 유동이 없을 때 센서 튜브 표면의 온도가 80℃가 되도록 하여 실험을 하였다. 센서 튜브내부에 흐르는 질량 유량의 변화는 대류에 의한 열전달 양을 결정하며, 이로 인한 온도차는 센서의 위치에 따라 대류와 전도의 양이 다르므로 입구와 출구의 각 두개의 지점 값을 비교한 온도차를 조사하여 적절한 센서의 위치를 찾는다.

4.2 실험 장치 구성 및 방법

스퍼터링 등의 같은 반도체 제작공정에서 사용되는 다양한 종류의 가스에 대한 MFC의 보정(calibration)은 질소를 이용한다. Fig. 4.3은 가스의 흐름을 나타내는 개요도이고 본 실험에 사용한 질소 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 미세 조절된 압력이 질량 유량 센서로 공급된다. Photo. 4.2는 실험장치의 사진으로서 측정밸브는 린텍(Lintec)사의 제품으로서 측정영역이 300SCCM까지 가능한 모델을 사용하였고, 측정밸브의 질량 유량의 측정 정밀도(accuracy)와 반복정밀도(repeatability)는 각각 $\pm 1\%$

와 $\pm 0.15\%$ 이다. 여기서 정밀도는 셋팅(setting) 점에서 표준치와 실제 유량사이의 차이이고, 반복정밀도는 실제 측정되는 유량의 반복정밀도이다. 휴렛 팩커드(Hewlett Packard)의 직류 전원 공급기(DC power supply)에 의해 열선에 공급되는 전압과 전류의 정밀도는 $\pm 1\%$ 이다. 열선은 직경이 0.04 mm, 저항은 855 Ω/m 이고 튜브 외경에 20회를 감았다. 열선의 성분은 니켈 52%, 철 24%, 크롬 14%, 탄소 8%로 구성되어 있다. 열선은 절연이 되지 않은 나선(bare wire)이므로 센서튜브 표면과 열선을 신나로 세정한 후 에나멜로 절연하고 열선을 감은 후 다시 에나멜로 절연하였다. 열선에 인가하는 전압과 전류를 결정하기 위하여 여러 경우에 대하여 실험하였고 최종적인 전압과 전류치는 8V, 0.05A로 정하였다. 튜브의 재질은 스테인레스강 316L로 다양한 튜브에 대하여 실험을 하였고 최종적으로 선택한 튜브는 외경이 0.9 mm이고 대응하는 내경은 0.65 mm이다. 튜브의 외경에 부착시킨 온도 측정 센서는 오메가(Omega)사의 K 방식 열전대를 사용하였으며 직경은 0.07 mm이다. 열전대를 센서 튜브 표면에 부착하기 위하여 납땜을 이용하였고 SUS와 납은 잘 붙지 않기 때문에 SUS FLUX라는 첨가제를 이용하여 납땜을 하였다. 납의 크기는 가로 세로 높이가 각각 1.0 mm, 0.5 mm, 0.5 mm이다. 열선으로부터 1.5 mm에서 각각의 온도 계측 지점을 S1, S2, S3, S4라고 한다. Fig. 4.4는 센서튜브의 치수 및 열선과 센서의 위치이다. 유동이 발생한 후 정상상태(steady state)에 도달한 결과를 이용하기 위하여 전원 공급 후 열적인 평형에 도달한 20초부터 온도를 계측하여 선형성과 신호의 크기를 분석하였다. 센서로부터의 온도를 측정하기 위하여 오메가(Omega)사의 HH507R 써모미터(thermometer)를 사용하였다. 튜브 외부의 단열재는

유리섬유(glass fiber)를 이용하였고 임계두께(critical thickness)는 실험을 통하여 8 mm임을 확인하였으며 사용한 단열재의 두께는 20 mm로써 실험의 조건으로 타당하다. 각 유니트 사이의 연결은 외경 6 mm의 SUS 튜브를 사용하여 맥동현상을 방지하였다. 본 실험은 동일한 실험 조건하에서 5회씩 반복 수행함으로써 데이터의 신뢰도를 높였다.

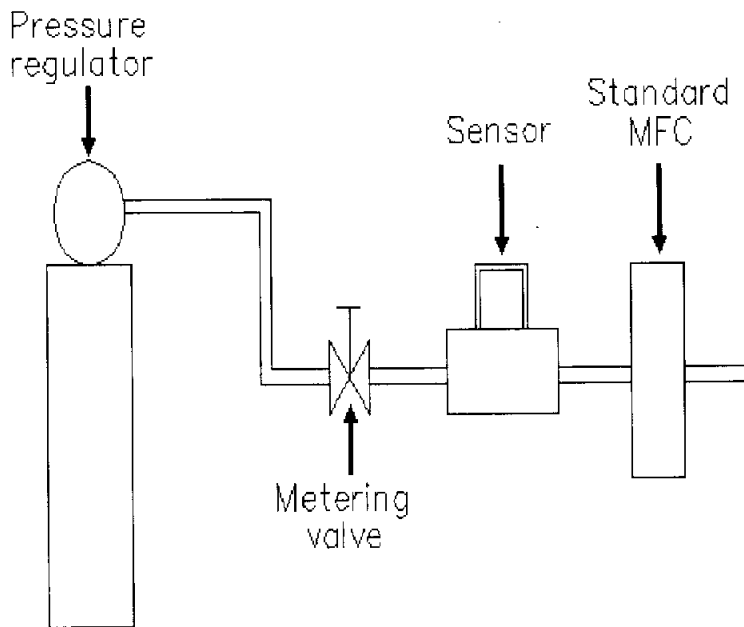


Fig. 4.3 Experimental arrangement

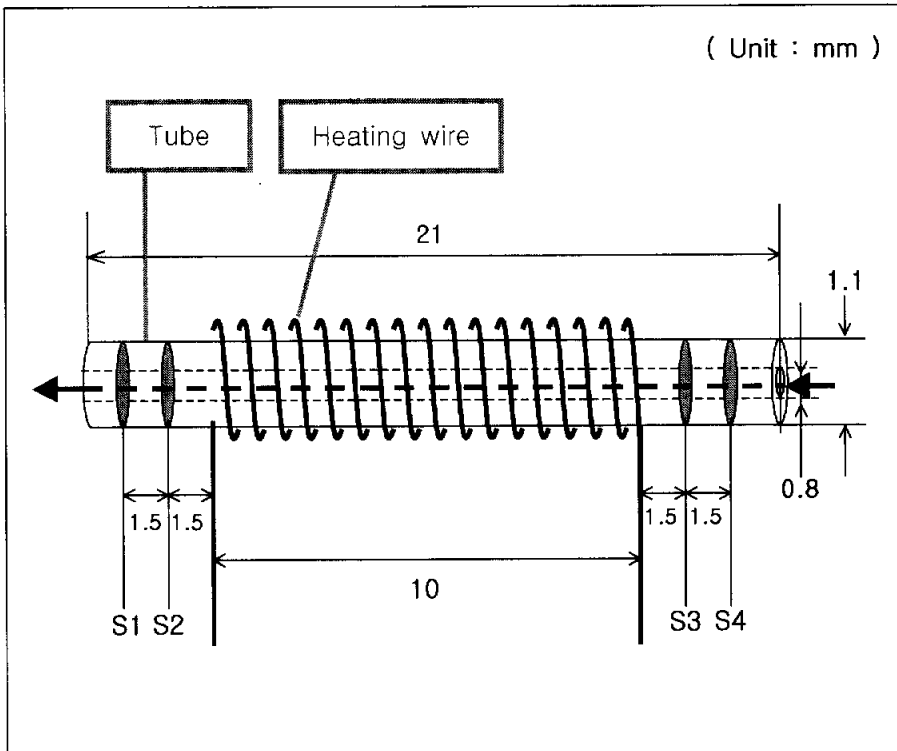


Fig. 4.4 Dimension of sensor tube in the MFC

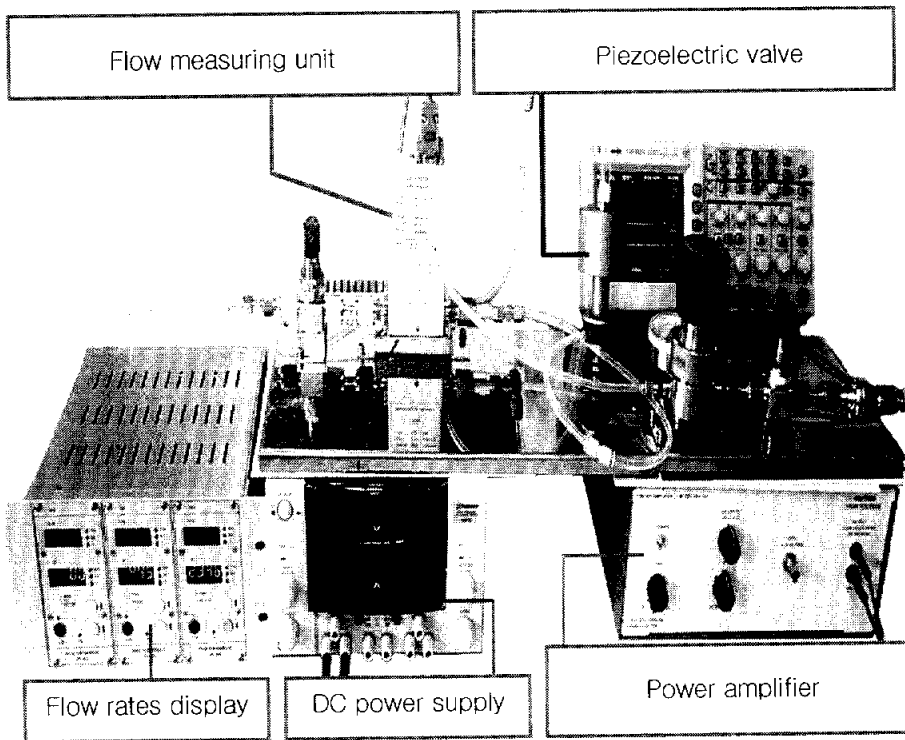


Photo. 4.2 Measuring equipment of flow rate

4.3 실험 결과 및 성능 분석

4.3.1 전도 실험

Fig. 4.5는 센서 튜브 내에 유체의 흐름이 없는 경우인 0 SCCM일 때 전도현상에 의한 열전달이 일어나는 경우를 나타낸다. 5V에서 8V까지의 범위에서 1V 간격으로 인가 전압별 실험을 하였고 열선에서 가까운 S2와 S3 및 열선에서 먼 S1과 S4에서 온도의 차이를 측정하면 전도에 의한 효과를 알 수 있다. 센서 튜브의 길이방향과 반경방향으로 발생하는 온도구배에 의한 전도현상이 발생하며, 8V에서 S2와 S1 지점의 전도로 인한 온도 차는 22℃, S3과 S4 지점의 전도로 인한 온도 차는 약 20℃가 발생한다. 전도에 의한 열전달은 열선을 중심으로 대칭이므로 입구 측과 출구 측의 온도차를 유발시키지는 않으나 센서 튜브내의 열선(heat line)을 예측하는 자료로 활용될 수 있다. Fig. 4.6은 축방향의 온도 분포로서 입구 측과 출구 측의 온도구배는 비슷하나 센서 실험 장치의 제작 상 완벽하게 양단의 온도가 대칭이지 못하다.

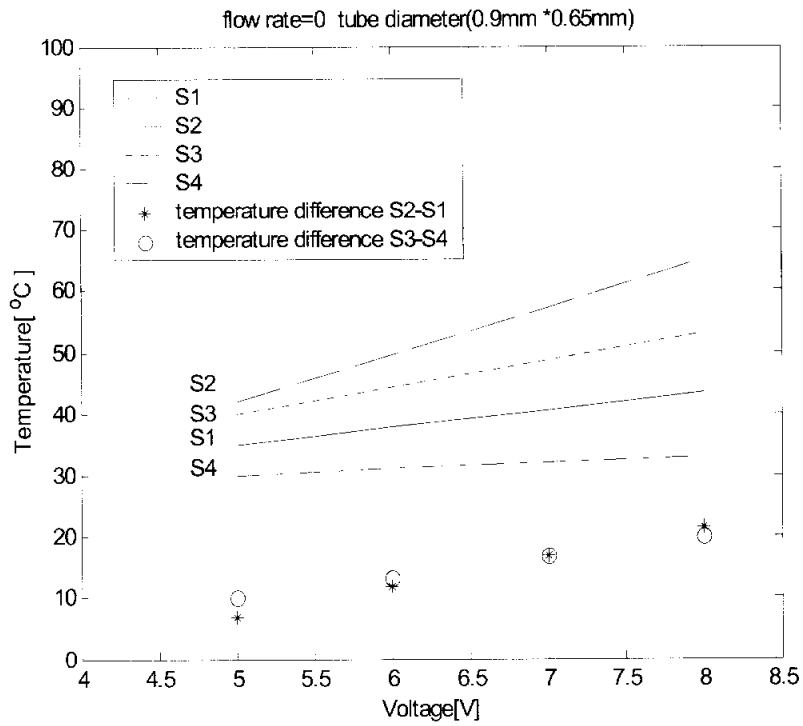


Fig. 4.5 Temperature gradient

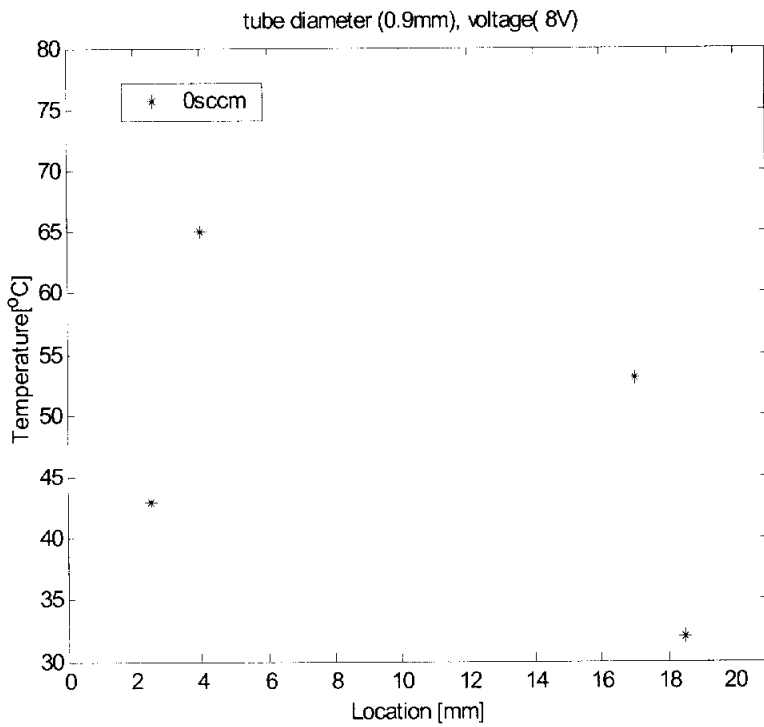


Fig. 4.6 Temperature along the axial direction

4.3.2 질량유량과 응답시간

공급가스의 압력이 2.5×10^5 Pa이고, 열선에 8V의 전압이 공급될 때 Fig. 4.7과 같이 유량에 따른 각 센서의 온도변화를 살펴보면 입구측인 S3과 S4에서는 유량의 증가에 따라 대류에 의하여 온도가 감소한다. 저속의 질량유량의 범위에서는 유체의 온도와 센서튜브 표면의 온도가 같거나 오히려 출구 측의 열을 뺏으므로 40 SCCM 이하에서는 출구측인 S1과 S2에서 온도가 감소 후 질량유량이 증가함에 따라 온도가 증가한다. 가스의 흐름이 증가함에 따라 센서튜브의 입구는 열량이 방출되고 출구는 열량이 유입되는 현상이 뚜렷해진다. 이때 대류에 의한 열량은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$Q_{conv} = m_f c_{pf} \Delta T_f \quad (4.6)$$

여기서 $\Delta T_f = T_{fo} - T_{fi}$, m_f 는 가스의 질량유량, c_{pf} 는 가스의 비열이다. ΔT 는 센서튜브의 온도차인 ΔT_t 와 유체의 온도차인 ΔT_f 로 구분할 수 있다. 이러한 대류열량은 시간이 지나면서 입구와 출구의 온도차를 유발하기 때문에 센서튜브 표면의 한 지점에서 시간에 따른 온도변화는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\rho_t V_t c_{pt} \frac{dT_1}{dt} \approx \rho_t V_t c_{pt} \frac{\Delta T_1}{dt} \quad (4.7)$$

여기서 $\Delta T_1 = T_{final} - T_{initial}$, V_t 는 센서튜브의 체적이다. 천이(transient) 시간에서 사용하는 식(4.7)과 대류에 의해 이동된 에너지가 같다고 볼 수 있으므로 식(4.8)과 같이 된다.

$$\rho_t V_t c_{pt} \frac{\Delta T_1}{dt} \approx m_f c_{pf} \Delta T_f \quad (4.8)$$

따라서 응답 시간은 식(4.9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$t \approx \frac{\rho_t V_t c_{pt}}{m_f c_{pf}} \quad (4.9)$$

그러므로 응답시간은 센서튜브의 열 질량(thermal mass)과 가스의 질량 유량에 의하여 영향을 받음을 알 수 있고, 센서튜브의 열 질량의 증가는 응답시간을 느리게 하고 가스의 질량유량의 증가는 응답시간을 빠르게 한다.

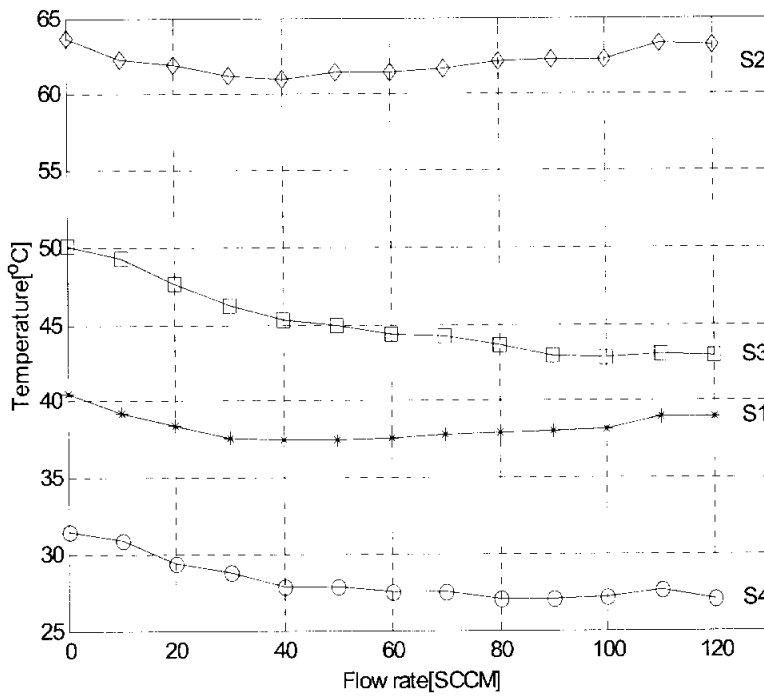


Fig. 4.7 Temperature of each sensor with flow rate(2.5×10^5 Pa)

4.3.3 센서 튜브 직경변화 실험

센서 튜브의 직경 변화가 성능에 미치는 영향을 알아보기 위하여 센서 튜브의 직경이 Table 4.1과 같은 경우에 대하여 실험을 하였다. 실험을 하기 위한 질량유량은 반도체 제작공정에서 가장 많이 사용하는 0에서 100SCCM의 중간유량인 50SCCM으로 고정하였다. Fig. 4.8은 직경이 커지면서 응답시간이 선형적으로 증가함을 보여주고 있다. 센서 튜브 직경이 늘어나면서 응답시간이 느려지는 원인은 센서 튜브 직경이 커짐에 따른 센서 튜브의 열 질량(thermal mass)이 증가하기 때문이다. Fig. 4.9에서 보는 바와 같이 센서 튜브의 벽 두께를 고려한 센서 튜브 단면적 변화에 대한 결과도 역시 응답시간이 늘어나고 있음을 보여준다. 또한 직경이 늘어나면서 정해진 질량유량대비 유속이 느려져서 대류에 의한 열 전달량이 감소되고 센서 튜브 단면적의 증가로 인해 전도에 의한 열 전달량이 증가하는 것도 응답시간을 줄이는 원인이 된다.

Table 4.1 Dimension of sensor tube

Out diameter (mm)	Inner diameter (mm)	Thickness (mm)
0.3	0.16	0.07
0.5	0.3	0.1
0.9	0.65	0.125
1.1	0.8	0.15

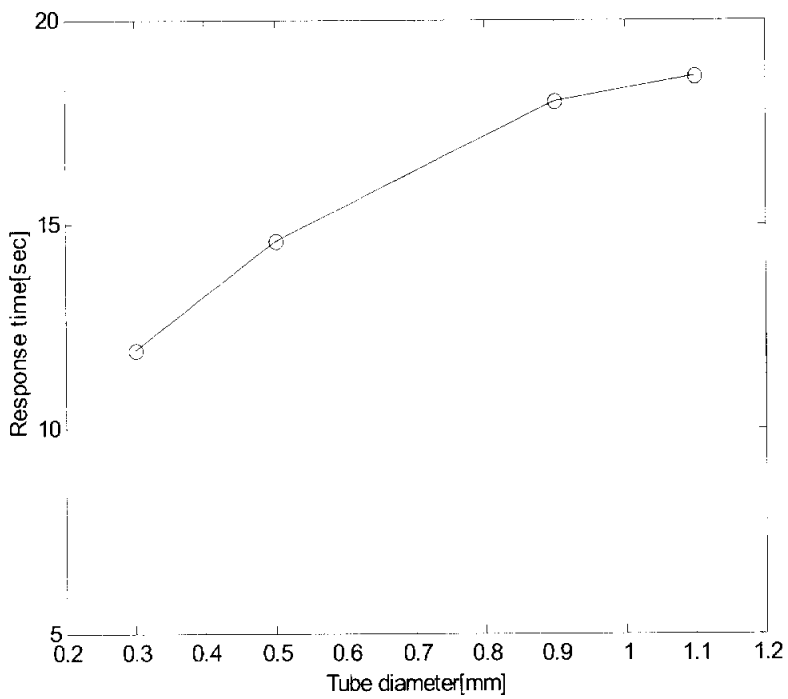


Fig. 4.8 Response time(tube diameter)

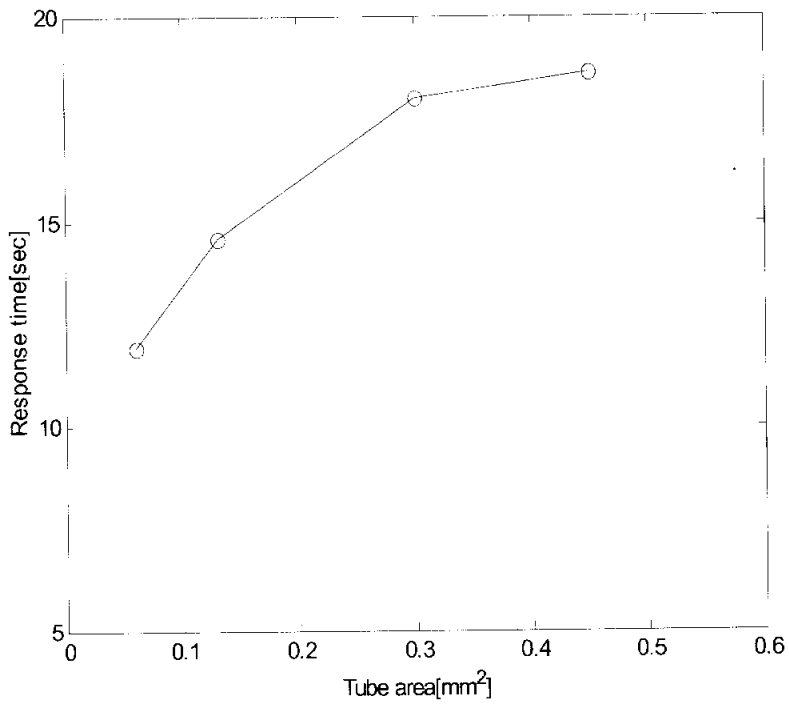


Fig 4.9 Response time(tube area)

4.3.4 인가전압별 온도차 실험

열량 공급의 방식은 열량을 고정하는 정열량 방식과 센서 튜브의 최대 온도를 일정온도가 되도록 하는 정온도 방식이 있다. 본 실험에서는 정열량 방식을 사용하여 Fig. 4.10에서 S2와 S3에 열선에 공급되는 전압으로 인한 S2와 S3의 온도를 비교하였고, 전압에 비례하여 대류에 의한 열량이 증가하여 센서 튜브 표면의 온도차를 증가시킨다. 열량의 변화로 인하여 유량의 변화에 따른 기울기가 증가함을 알 수 있다. 이때 온도의 차는 MFC 센서의 신호의 크기에 해당한다. 또한 전압이 낮을수록 질량 유량이 늘어나면서 선형성이 저하되는 현상을 알 수 있고 이유는 정해진 열량에서 대류로 인하여 공급될 수 있는 열량이 제한되기 때문이다.

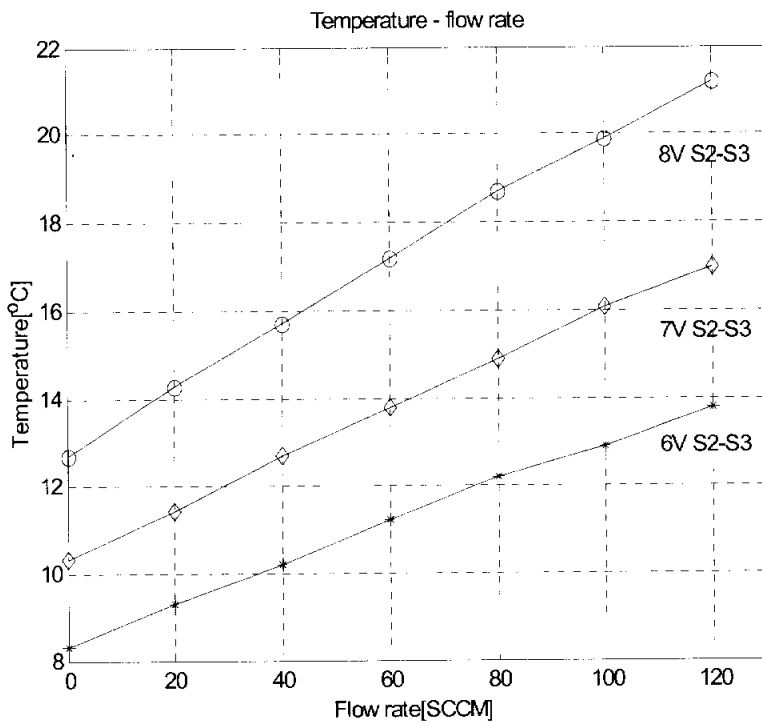


Fig. 4.10 Effect of supplied voltage

4.3.5 센서 위치와 유량 실험

Fig. 4.11은 50SCCM에서 80SCCM으로 유량을 증가시킬 때 열선을 거친 출구의 센서 S1과 S2에서 유량의 증가에 따라 대류의 영향으로 온도가 상승하고, Fig. 4.12는 입구의 센서 S3와 S4에서 센서 튜브로부터 차가운 외부 가스로 대류로 열전달 현상이 발생하여 온도가 하강함을 나타낸다. 또한 S2와 S3의 온도차가 S1과 S4의 온도차 보다 크다는 것을 나타내고, 이를 통하여 대류로 인한 S2와 S1 및 S3와 S4사이의 각 위치에 대한 온도 차이를 예측할 수 있다.

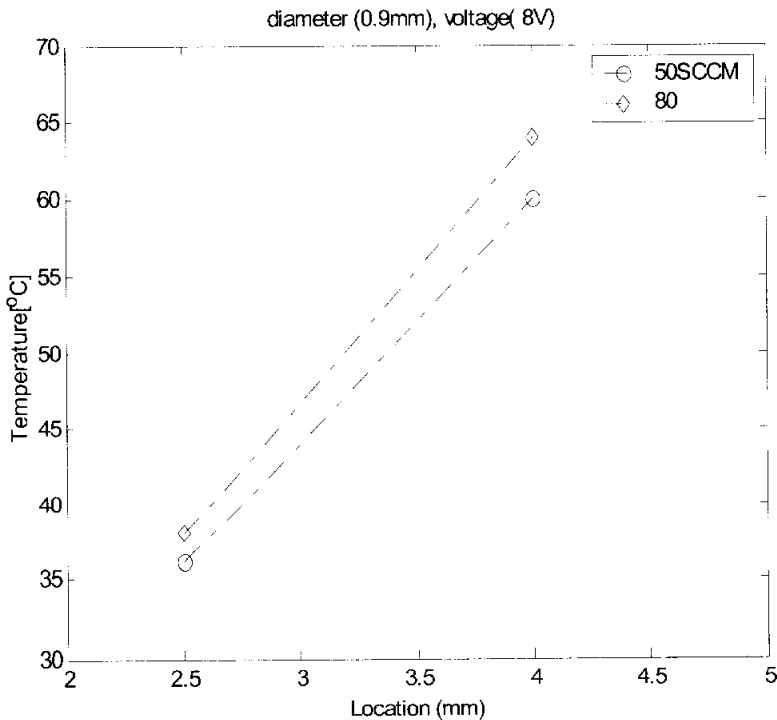


Fig. 4.11 Temperature distributions of sensor S1 and S2 versus flow rate

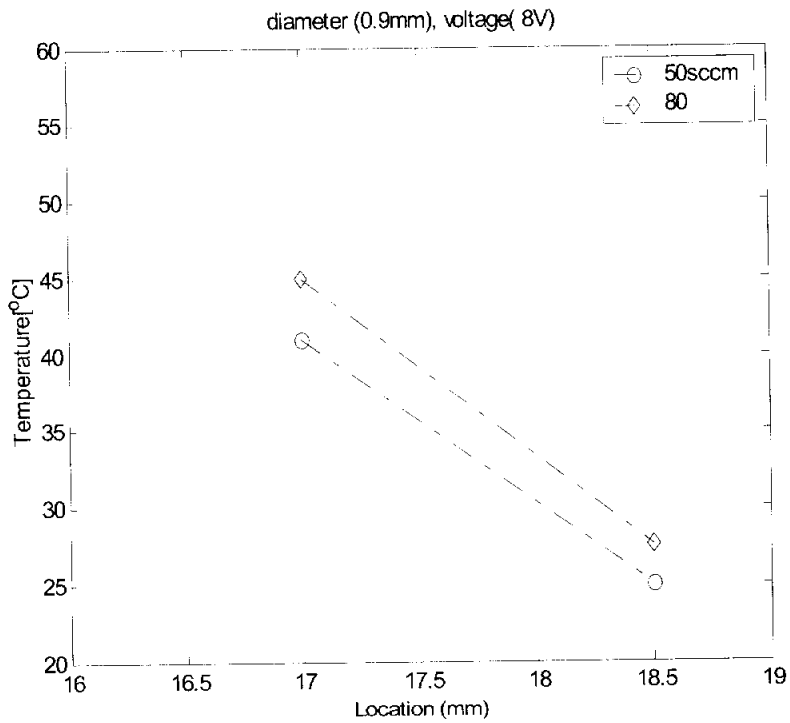


Fig. 4.12 Temperature distributions of sensor S3 and S4 versus flow rate

4.3.6 센서의 성능

Fig. 4.13은 8V가 열선에 공급될 때 각각의 센서 사이의 온도차를 비교하고, 열선을 중심으로 온도계측 위치가 대칭이며 온도차가 큰 S2와 S3를 질량유량제어기의 센서로 사용할 수 있음을 나타낸다. Fig. 4.14는 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 선형성은 입력과 출력과의 관계를 0SCCM에서 100SCCM까지의 직선으로부터 벗어난 최대의 오차로 정의할 때 비선형 오차는 1%를 갖는다. 비선형이 증가하면 부가적인 회로가 필요하거나 룩 업 테이블(look up table)이 필요하다. 0에서 100SCCM까지의 유량범위에 대하여 풀-스케일 출력(full scale output)은 100SCCM에서 4V와 0SCCM에서 2.5V의 차이인 1.5V이며, 12비트의 ADC를 사용하였으므로 최소 0.36mV를 감지할 수 있고 양자화 에러(quantisation error) 1/2 비트를 고려하면 0.6mV에 대한 유량인 0.1SCCM을 계측할 수 있는 분해능(resolution)을 갖는다. 또한 온도감도(sensitivity)는 유량변화 1 SCCM 당 $\pm 0.05\%$ 의 출력변화가 있다. 따라서 100SCCM의 레인지(range), 1%의 비선형성, 0.1 SCCM의 분해능, 0.05V/SCCM의 감도와 같은 성능특성을 만족하므로 목표로 하는 센서로서의 자격이 있다.

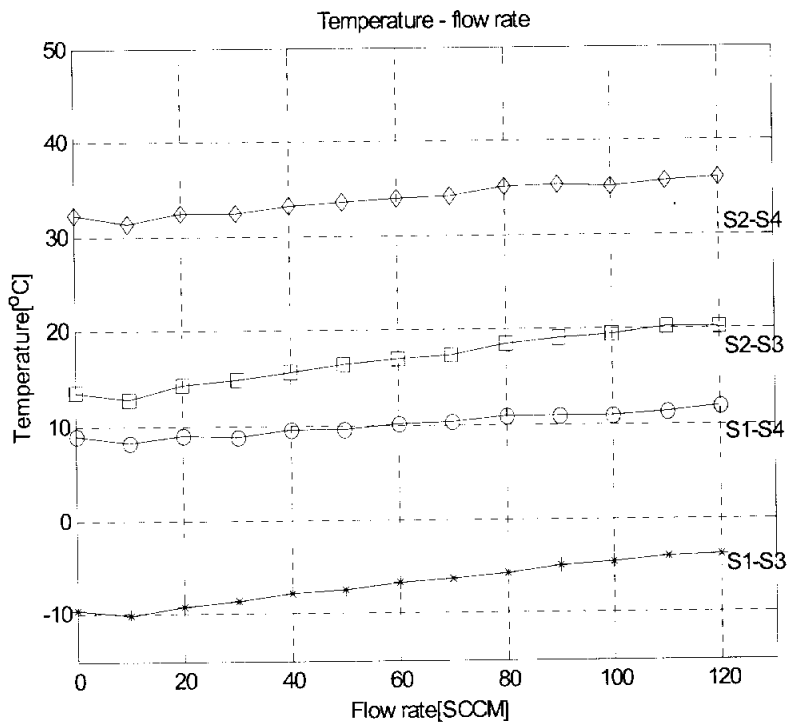


Fig. 4.13 Temperature difference with sensor location

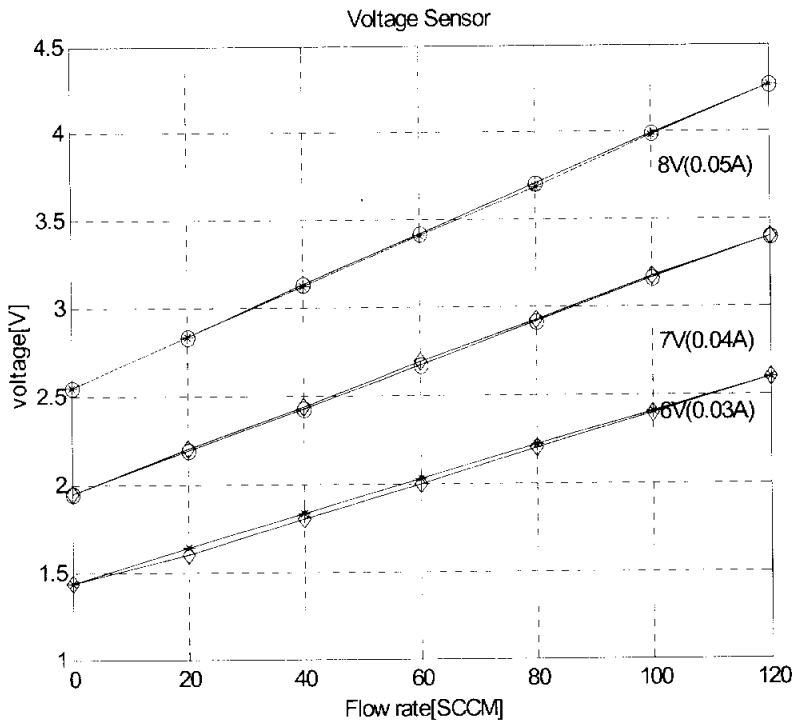


Fig. 4.14 Relation between sensor voltage and flow rate by way of supplied voltage

Fig. 4.15는 센서 후단의 신호처리 흐름도이다. 센서신호를 12비트 ADC 입력으로 한다. 센서에서 받은 입력 신호는 고주파성분을 갖는다. 따라서 100 Hz 이상의 잡음을 차단하기 위하여 아날로그 필터를 구현하고 고주파 잡음을 제거한 후에 ADC에서 입력을 16진수로 읽는다. 주된 사용 영역이 100SCCM까지인 질량 유량 센서의 동특성을 파악하기 위하여 Fig. 4.16과 같이 유량을 0 SCCM에서 200 SCCM으로 스텝입력을 인가하고 500 Hz로 샘플링하여 시간영역에서 센서의 응답시간을 측정하면 목표치의 95%에 이르는 시간이 8초로서 20초를 목표로 하는 본 연구의 목적에 부합하는 동특성이 확보되므로 센서로서 자격이 있다.

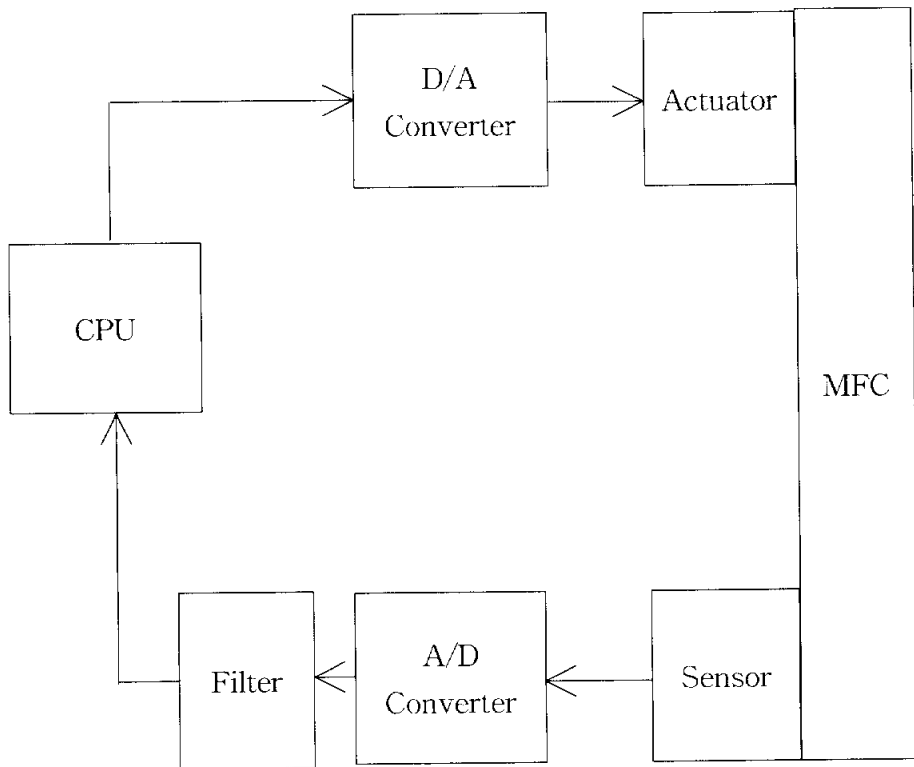


Fig. 4.15 Flow chart of signal processing

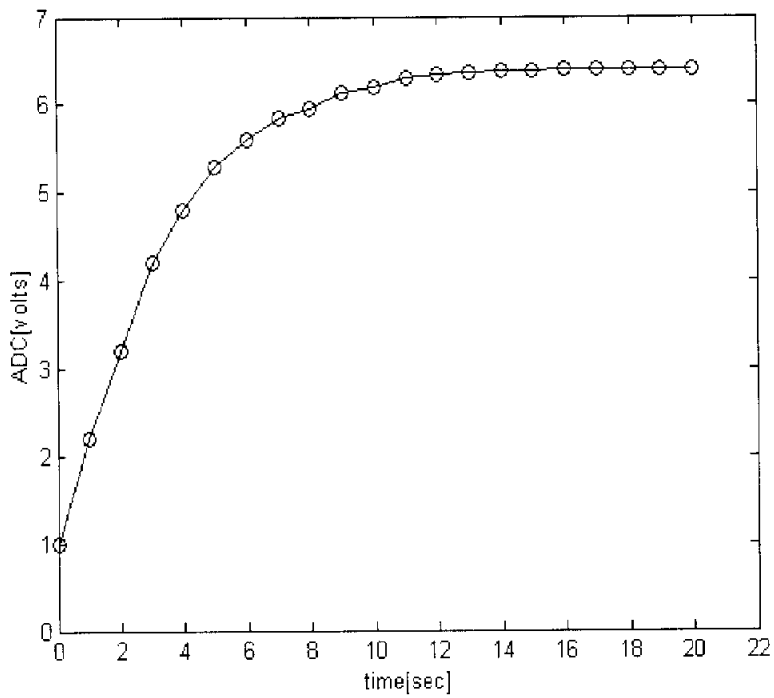


Fig. 4.16 Response of step input

제 5 장 질량 유량 제어기의 설계

Fig. 5.1과 같은 질량 유량 제어기를 설계하기 위하여서는 우선 플랜트(plant)인 MFC의 수학적 모델이 필요하다. 폐루프(closed loop)인 MFC 시스템의 제어기에서 입력신호는 센서의 ADC 전압이고 출력신호는 압전체의 DAC 전압이다. DAC를 통하여 출력되는 DC 전압과 MFC에 흐르는 유량과의 관계는 비선형이다. 또한 제작된 MFC는 센서, 밸브 및 금속관 등으로 구성되어서 수식 모델을 이론적으로 구하기는 매우 어려우므로 DC 이득을 이용한 모델링을 적용하고 Ziegler-Nichols 조정방법을 통한 PI 제어를 수행하여 동특성인 응답시간을 확인하였다.

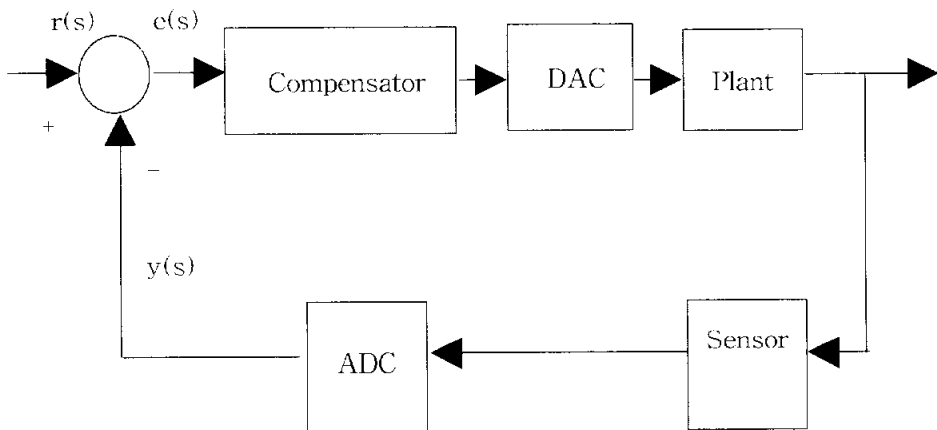


Fig. 5.1 Block diagram of MFC

5.1 MFC의 모델링

Fig. 5.2와 같이 입력인 DAC와 출력인 질량유량과의 관계가 비선형인 질량흐름 제어기의 구동부와 센서의 특성을 파악하기 위하여 0 SCCM(standard cubic centimeter per minute)에서 120 SCCM으로 컨트롤 밸브에 계단과 입력(step input)을 DAC를 통하여 가하고 센서의 출력을 거쳐서 ADC를 통하여 획득한 응답특성은 Fig 5.3과 같다. 이때 MFC에 흐르는 유량은 실험장치의 표시기를 통하여 확인한다. 스텝응답이 전형적인 1차 지연요소의 특성을 나타내므로 구동계와 센서부를 1차 미분방정식으로 식(5.1)과 같이 표현한다.

$$\frac{dy(t)}{dt} + Ty(t) = ATr(t) \quad (5.1)$$

여기서 T 는 시정수로서 시스템의 응답속도에 관한 정보를 가지며, A 는 DC 이득으로 계단과 입력에 응답하여 출력이 최종적으로 접근하는 값이다. 식 (5.1)의 전달함수는 식(5.2)와 같다.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{A}{1 + Ts} \quad (5.2)$$

계단과 응답 $y(t)$ 는 식(5.3)과 같이 주어진다.

$$y(t) = A(1 - e^{-\frac{1}{T}t}) \quad (5.3)$$

Table 5.1에서 질량흐름 제어기의 DC 이득을 구하면 1.88이 된다. 초기 2.6초를 제외하면 상승시간은 7.4초이고 이의 역수를 취하여 시정수를 0.135가 된다. DC 이득과 시정수를 이용하면 1차 시스템의 개루프 전달함수를 구할 수 있고, 적분 항이 있다고 가정하여 모델 $P_{DC}(s)$ 를 구하였다. 모델에 대한 응답특성을 Fig. 5.3에 표시하면 0에서 100SCCM의 범

위 내에서 계단과 입력에 대한 센서의 응답특성과 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

$$P_{DC}(s) = \frac{1.88(0.135s + 0.135 \cdot 10^{-4})}{s(s + 0.135)} \quad (5.4)$$

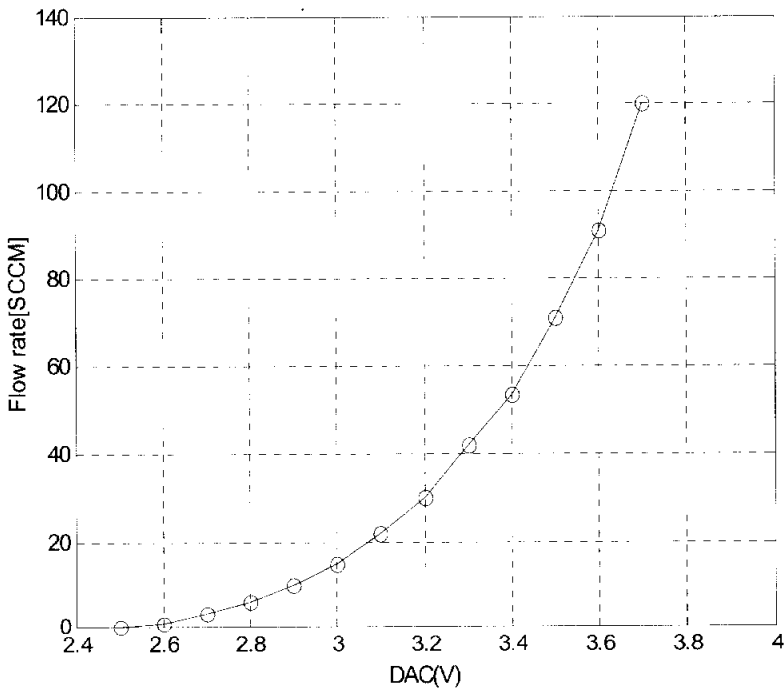


Fig. 5.2 Nonlinear characteristics between input voltage and flow rate

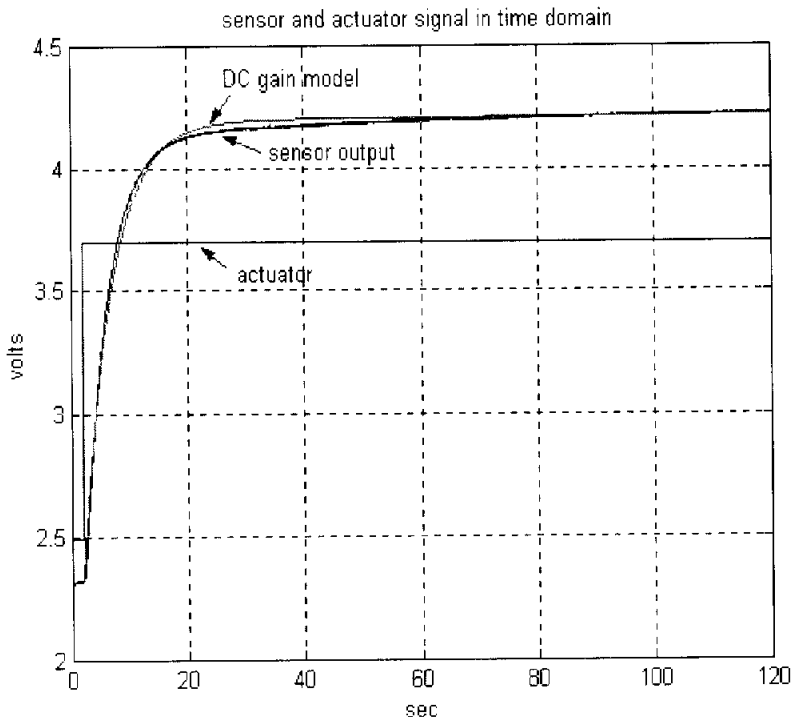


Fig. 5.3 Response of step input of actuator and sensor

Table 5.1 Voltage of input and output

Flow Rate (SCCM)	DAC (V)	ADC (V)
0	2.7	2.4
120	3.7	4.28

개루프의 모델링에 대하여 보드선도를 Fig. 5.4와 같이 작성하면 이득 교차 주파수가 약 $0.2[\text{rad/sec}]$ 이고, 이 주파수에 해당하는 위상각은 약 $-50[^\circ]$ 이므로 위상여유는 $180+(-50)=130[^\circ]$ 이고 안정하다.

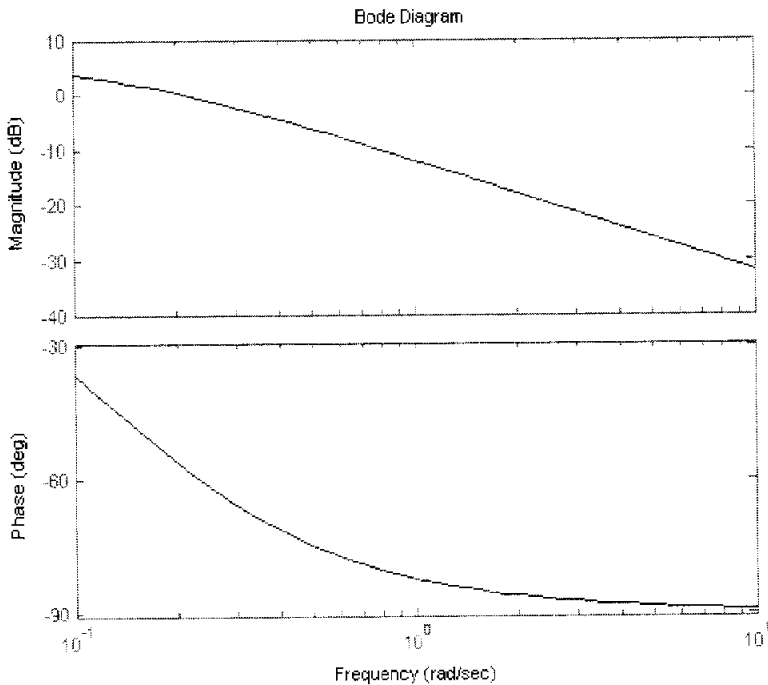


Fig. 5.4 Bode plot of $P_{DC}(s)$

5.2 제어기의 설계

MFC가 정밀하게 유량을 제어하도록 PID 제어기를 설계하기 위해서 제작된 MFC의 정확한 모델이 필요하다. 그러나 압전 밸브의 비선형성, 센서 출력의 비선형성, 압전 전압의 범위의 한계 등의 모델링 오차가 있으므로 DC 이득 모델을 이용하여 PID 이득을 결정하고 실험하였다.

$$K(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (5.6)$$

혹은 다음과 같이 표현된다.

$$K(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (5.7)$$

여기서, K_p 는 비례게인, K_i 는 적분게인 그리고 K_d 는 미분 게인이다. 또한 T_i 는 적분시간 혹은 리셋(reset)시간, 리셋시간의 역수 $1/T_i$ 를 리셋률(reset rate) 그리고 T_d 는 미분시간이다. 일반적으로 적분 제어요소는 일정한 입력에 대하여 정상상태오차가 발생하지 않도록 하는 효과를 가지고 있지만 시스템의 안정도를 저하시키는 경향이 있다. Fig. 5.5는 MFC의 제어블록선도로서 $r(s)$ 는 기준 입력이고 $y(s)$ 는 센서를 통하여 측정된 질량유량이다. Ziegler-Nichols 조정방법을 통하여 이득을 구했으며 시정수가 빠르고 외란이 적으므로 PI제어만으로 가능하다. 이때 사용한 비례, 적분이득들은 각각 5, 50이다. 센서전압에 대한 기준 입력을 3.2V로 설정하였고 이것에 해당하는 유량속도는 36 SCCM이다. 일반적으로 MFC는 단계별로 용량을 구분하여 사용하므로 과도하게 유량이 커지는 것을 방지하기 위하여 압전체 인가전압의 임계전압을 3.7 볼트로 설정하였다. 제어 실험결과가 Fig. 5.6과 Fig. 5.7에 나타나 있으며, 과도 상태중에 나타나는 출력의 최대오차인 퍼센트 오버슈트는 0.56%, 정상상태응

답의 50%에 도달하는데 걸리는 시간인 지연시간은 1.5초, 경감쇠 (under-damped) 시스템에서 정상상태에 도달하는 시간인 상승시간은 2.5 초, 정상상태 오차의 1% 이내로 수렴하는 시간이 4초임을 알 수 있으므로 질량 유량 제어기로서 가치가 있다.

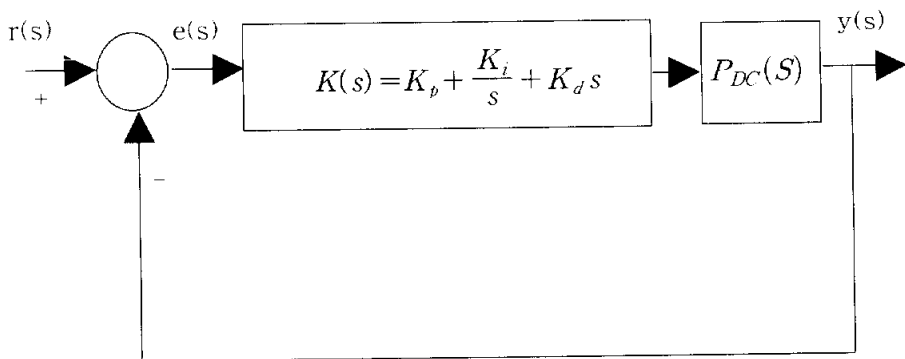


Fig. 5.5 Block diagram of the controller

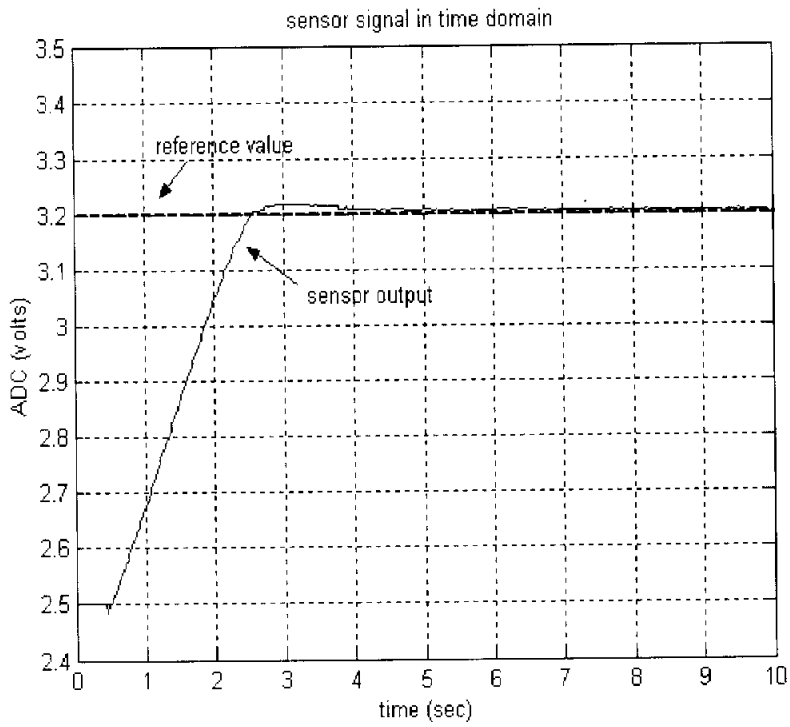


Fig. 5.6 Sensor voltage for PI control

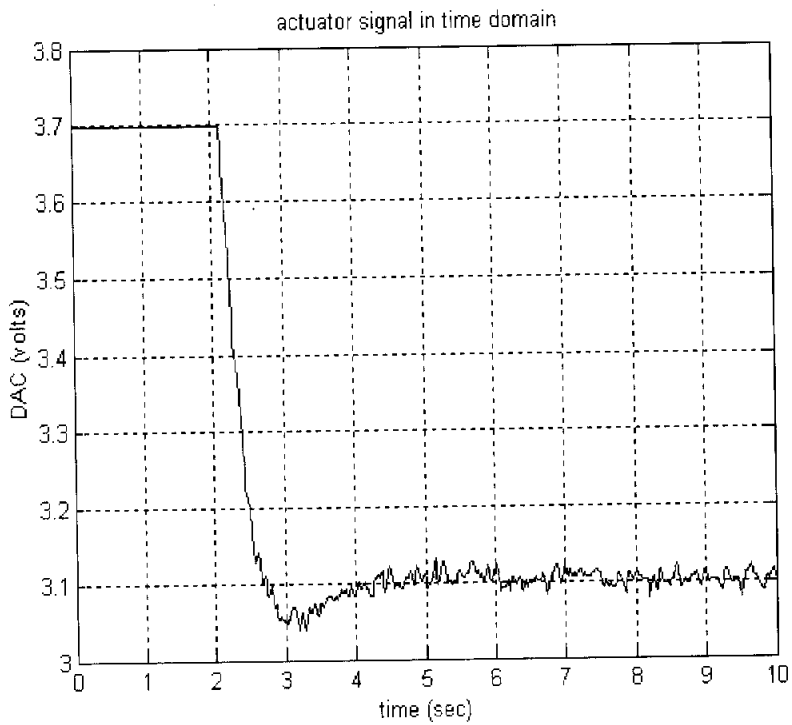


Fig. 5.7 DAC voltage for PI control

제 6 장 결 론

디스크 압전체를 이용한 비선형 질량 유량 제어기의 특성 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 디스크 압전체에 인가된 전압과 변위의 선형관계식을 이론식으로 유도하고 실험을 통하여 검증하였으며, 초기 기밀 유지를 위하여 압전체에 부착된 대 변형이 일어나는 판스프링의 형상에 따른 변위와 반력을 유한요소해석과 실험을 통하여 구하였다. 이를 통하여 반도체 제작공정에 사용되는 설비의 핵심부품인 질량흐름제어기에 필요한 디스크 압전체와 판스프링의 설계가 가능하도록 하였다.

(2) 판 스프링의 반력과 가스의 압력이 동시에 작용할 때 입력인 압전체의 인가전압과 출력인 질량유량의 사이의 관계를 제안함으로써 제어에 필요한 모델링에 비선형성이 존재함을 확인하였다.

(3) 가스의 흐름이 있는 유량센서에서 대류현상으로 인한 센서 튜브와 가스간의 대류현상이 발생할 때 질량유량이 50SCCM 이상과 50SCCM 이하를 구분하여 질량유량의 특성을 파악하였으며 이의 구분은 센서튜브의 열 질량에 기인함을 알 수 있었다. 센서튜브의 직경과 단면적의 변화에 따른 열 질량 효과로 인한 응답시간을 조사하였다.

(4) 응답센서의 위치에 의한 효과는 튜브 입구는 S2에서 튜브 출구는 S3에서 대류로 인한 효과가 가장 크다. 따라서 S2와 S3의 위치에 있는

센서를 사용할 때 분해능, 선형성, 감도, 응답시간의 성능을 확보할 수 있으므로 질량 흐름 제어기의 센서로 사용이 가능하다.

(5) 인가전압과 유체의 흐름사이에 비선형성이 존재하는 유량계에 대한 DC 이득과 시정수를 이용하여 모델링을 하였고, 50SCCM의 범위에서 DC 이득 모델을 이용한 PI제어를 수행할 때 4초에 정상상태오차의 1% 이내로 수렴하므로 사용용량을 구분하여 가스를 공급하는 MFC로서 유용한 가치가 있다.

참 고 문 헌

1. J. M. Benson, W. C. Baker, E. Easter, 1970, "Thermal Mass Flow-meter," Instrument Control System. Vol. 43, pp. 85~87.
2. R. Le Letty, 2002, "Valves Based on Amplified Piezoelectric Actuators," 8th International Conference on New Actuators, pp. 141~144.
3. T. Bailey, J. E. Hubbard, 1981, "Distributed Piezoelectric-Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam," AIAA Journal of Guidance and Control, Vol. 8, No. 5, pp. 606~611.
4. B. R. Patnaik, G. R. Heppler, D. Wang, 1993, "Stability Analysis of Piezoelectric Vibration Controller for an Euler-Bernoulli Beam," Proceeding of the American Control Conference, San Francisco.
5. S. E. Burke, J. E. Hubbard, 1986, "Distributed Parameter Control Design for Vibration Beams Using Generalized Functions," IFAC Control of Distributed Parameter System, Los Angeles.
6. E. F. Crawley, J. de Luis, 1985, "Use of Piezoceramics as Distributed Actuators in Large Space Structure," 26th SDM AIAA/ASME/ASCE/ANS Conference.
7. J. M. Plump, J. E. Hubbard, and T. Bailey, 1987, "Nonlinear Control of a Distributed System: Simulation and Experimental Results," ASME Trans. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 109, pp. 133-139.
8. A. Baz and S. Poh, 1988, "Performance of an Active Control System with Piezoelectric Actuators," Journal of Sound and Vibration, No. 2, pp. 327-343.

9. E. K. Dimitriadis, C. R. Fuller, C. A. Rogers, 1991, "Piezoelectric Actuators for Distributed Vibration Excitation of Thin Plates," ASME Trans. Journal of Vibration and Acoustics, pp. 101-107.
10. R. L. Clark, M. R. Flemming, C. R. Fuller, 1993, "Piezoelectric Actuators for Distributed Vibration Excitation of Thin Plates: A Comparison Between Theory and Experiment," ASME Trans. Journal of Vibration and Acoustics, pp. 332-339.
11. S. Y. Hong, 1992, "Active Vibration Control of Adaptive Flexible Structures using Piezoelectric Smart Sensors and Actuators," Ph.D. Thesis, The Pennsylvania State University.
12. H. T. Banks, R. J. Silcox, R. C. Smith, 1991, "Modeling and Control of Acoustic Structure Interaction Problems Via Piezoceramic Actuators: 2D Numerical Examples," ASME Journal of Vibration and Acoustics, July, pp. 386~396.
13. C. R. Fuller and C. Hansen, 1990, "Active Control of Interior Noise in Modal Aircraft Fuselages using Piezoelectric Actuators," AIAA 13th Aeroacoustics Conference, Tallahassee, FL.
14. R. L. Clark, C. R. Fuller, 1992, "Experiments on Active Control of Structurally Radiated Sound using Multiple Piezoceramic Actuators," Journal of Acoust. Soc. Am., Vol. 91, No. 6, pp. 3313-3320.
15. S. J. Kim, 1992, "A Study of Piezoelectric Actuators for Active Noise and Vibration Control," Ph.D Thesis, Purdue University, Dec.
16. S. Y. Lin, 1998, "Coupled Vibration Analysis of Piezoelectric Ceramic Disk Resonators," Institute, Journal of Sound and Vibration, pp. 205~217.

17. N. W. Hagood, W. H. Chung, A. von Flotow, 1990, "Modelling of Piezoelectric Actuator Dynamics for Active Structural Control," AIAA 31th structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Long Beach, April.
18. B. A. Auld, 1990, "Acoustic Fields and Waves in Solids," Vol. 1: second edition, Krieger Publishing Company, pp. 265~356.
19. N. W. Hagood, W. H. Chung, 1990, "Modeling of Piezoelectric Actuator Dynamics for Active Structural Control," AIAA 31th Structures, Structures Dynamics and Materials Conference, Long Beach, April.
20. 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.
21. K. Komiya, F. Higuchi, K. Ohtani, 1988, "Characteristics of a Thermal Gas Flow meter," Rev. Scientific Instrument, Vol. 59, No. 3, pp. 477~479.
22. 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.
23. W. M. Kays, M. E. Crawford, 1993, "Convective Heat and Mass Transfer," 3rd ed., McGRAW-Hill, New York(Chapter 7).
24. S. V. Patankar, 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," 1st ed., Taylor & Francis, London(Chapter 4).
25. S. W. Churchill, H. H. S. Chu, 1975, "Correlating Equations for

- Laminar and Turbulent Convection from a Horizontal Cylinder," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 18, pp. 1049-1053.
26. S. W. Churchill, H. H. S. Chu, 1975, "Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a vertical Plate," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 18, pp. 1323-1329.
27. A. Bejan, 1995, "Convection Heat Transfer," 2nd ed., Wiley, New York, (chapter 1).
28. S. Kimuta, A. Bejin, 1983, "Visualization of Convective Heat Transfer," ASME J. Heat Transfer Vol. 105, pp. 916-919.
29. K. A. Hoffmann, S.T. Chiang, 1993, "Computational Fluid Dynamics for Engineers," 1st ed., A Publication of Engineering Education System 1, Wichita, Kansas, (Chapter 5).
30. K. Vafai, S. J. Kim, 1990, "Analysis of Surface Enhancement by a Porous Substrate," ASME J. Heat Transfer, Vol. 112, pp. 700-706.
31. J. P. Holman, 1990, "Heat transfer," seventh ed., McGraw-Hill, New York (Chapter 2)
32. S. F. Richard, 1995, "Theory and Design for Mechanical Measurements," second ed., Wiley, New York (Chapter 5)
33. M. Necati Ozisik, "Basic Heat Transfer," McGraw-Hill Company (Chapter 6)
34. Rolf H. Sabersky, "Fluid Flow," Macmillan (Chapter 2)
35. 이만형, 2000, "메카트로닉스," 사이텍미디어, pp. 16~46.
36. 김진수, 2000, "압전 액츄에이터와 초음파 전동기," 명현.
37. 고재용, 2003, "Ansys 와 유한요소법," 시그마프레스
38. Crandall, 1972, "An Introduction to the Mechanics of Solids," McGraw-Hill.

39. L. Meirovitch, 1986, "Elements of Vibration Analysis: second edition," McGRAWHILL , pp. 300-344.
40. R. Johansson, 1993, "System Modeling and Identification," Prentice-Hall International, pp. 104-133.
41. J. N. Juang and R. S. Pappa, 1985, "An Eigensystem Realization Algorithm for Modal Parameter Identification and Modal Reduction," Journal of Guidance and Control, Vol. 8, No. 5.
42. S. Rajaram and J. L. Junkins, 1985, "Identification of Vibrating Flexible Structure," Journal of Guidance and Control, Vol. 8, No. 4.
43. T. Williams, 1987, "Identification of Large Space Structure: A Factorization Approach," Journal of Guidance and Control, Vol. 10, No. 5.
44. J. N. Juang and H. Suzuki, 1988, "An Eigensystem Realization Algorithm in Frequency Domain for Modal Parameter Identification," ASME Trans. Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design, Vol. 110, pp. 24-29.
45. C. Minas and D. J. Inman, 1991, "Identification of A Nonproportional Damping Matrix from Incomplete Modal Information," ASME Trans. Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 113, pp. 219-224.
46. Juang, J. N. et al., 1993, "Frequency- Weighted System Identification and Linear Quadratic Controller Design," J. of Guidance, Control and Dynamics, Vol. 16, No. 2, pp. 330-336.
47. Min K. K, 1995, "System Identification Using Higher Order Model," Theories and Applications of Chem. Eng., Vol. 1, No. 1, pp. 187-190.

48. K. S. Jang, 2001, "Facial Features Detection Using Heuristic Cost Function," 정보처리학회, 제8·B권, 제 2호, pp. 183-188.
49. Y. T. Park, 1995, "Blackboard Scheduler Control Knowledge for Recursive Heuristic Classification," 한국전문가시스템학회, pp.61-72.
50. H. H. Hwang, 1990, "경험적 규칙을 이용한 자기 동조 PID 제어기," 전기학회, 39권, 5호, pp. 485-493.
51. D. J. Ewins, 1984, "Modal Testing: Theory and Applocation," John Wiley and Sone.
52. 김종식, 1988, "선형제어시스템공학," pp. 84-91.
54. 민홍기, 1997, "MATLAB 공학," pp. 270-288.
55. D. E. Johnson, 1976, "Introduction Filter Theory," Prentice-Hall Inc.
56. 이상경, 김영수, 2003, "압전체로 구동되는 질량흐름 제어기에서 레이놀즈 방정식을 이용한 유량 특성 연구," 동력공학회, 제7권, 제3호, pp. 22-27.
57. 이상경, 김영수, 2003, "질량흐름 제어기의 센서 튜브에서 열전달현상에 관한 연구," 동력공학회, 제7권, 제3호, pp. 69-73.
58. 이상경, 김영수, 2003, "세라믹 압전체에 부착된 팽스프링의 유한요소해석과 질량 흐름 제어에 관한 연구," 동력공학회, 제7권, 제4호.
59. 이상경, 김영수, 2003, "질량유량제어기용 센서튜브의 정특성과 동특성에 관한 연구," 한국박용기관학회
60. 이상경, 김영수, 2003, "열전대 센서와 압전체 구동기가 부착된 유량 제어기의 DC 이득을 이용한 제어에 대한 연구," 한국기계가공학회, 제2권, 제4호.

부록 A 시스템 식별을 이용한 모델링

평균 크기가 3.1V이고 주파수 대역이 1Hz로 제한된 Fig. A.1과 같은 DAC 신호를 구동부에 인가하였을 때에 측정된 ADC를 통한 센서전압이 Fig. A.2에 도시되어 있다. 측정된 ADC 신호의 주파수 대역은 대략적으로 0.1Hz로 정도로 제한되어 있음을 알 수 있다. 대역통과필터는 대역폭이 10Hz인 4차의 Butterworth 필터이다. DC 이득을 이용한 모델 $P_{DC}(s)$ 를 참고하여 MFC 개루프 이산 모델 $P_{id}[z]$ 을 2차로 선정하였고 그 계수들을 최소자승법(Least Square Method)으로 구하였다.

$$P_{id}[z] = \frac{(-0.108z^2 - 2.732z + 3.287) * 10^{-2}}{z^2 - 0.864z - 0.131} \quad (A.1)$$

P_{DC} 모델과 P_{id} 모델에 대한 극점과 영점을 Fig. A.3과 Fig. A.4에 나타낸다. $P_{DC}(s)$ 모델은 영점이 극점보다 허수축에 더 가까이 있기 때문에 위상은 항상 0보다 큰 값을 갖는다. $P_{id}[z]$ 는 극점이 우평면에 있으므로 불안정(unstable)하고 극점 혹은 영점이 우평면에 있으므로 비최소위상시스템(non-minimum phase system)이다. 비최소위상시스템은 안정도를 위하여 계인여유와 위상여유에 대한 검토를 동시에 수행하여야 한다. Fig. A.5와 Fig. A.6은 각각 가진기 입력과 센서출력의 주파수 영역의 신호이다. 5Hz 이하의 저주파 영역에서 -150dB이상을 갖는다. 시스템 식별기법으로 구한 모델과 DC 이득으로 구한 모델을 검증하기 위하여 주파수 대역이 1Hz로 제한한 또 다른 DAC 신호를 인가하고 그 때에 50초 동안에 측정된 센서전압에서 초기 10초 구간을 도식한 것이 Fig. A.7에 나타나 있다. 이 DAC 신호를 구해진 모델에 주었을 때의 출력이 또한 Fig. A.7에 있다. DC 모델 $P_{DC}(s)$, 식별 모델 $P_{id}[z]$ 은 실제 측정된 센서전압과 파형이 비슷함을 알 수 있다. DC 이득 모델과 식별모델의

단위계단 응답이 Fig. A.8에 나타나 있다. 20초 이후에 두 모델의 출력에 0.9V 정도 차이가 발생되는데 이것은 Fig. 5.1에 나타난 바와 같이 압전 밸브의 비선형성에서 기인된 것이다. 즉, DAC 전압이 4.7V에서의 개루프 MFC의 DC 이득이 DAC 전압이 3.1V에서의 그것보다 1.5배 정도 된다는 것을 나타낸다. 즉 본 연구에서 제안한 DC이득 모델이 비선형이 존재하는 시스템에 보다 적합함을 알 수 있다.

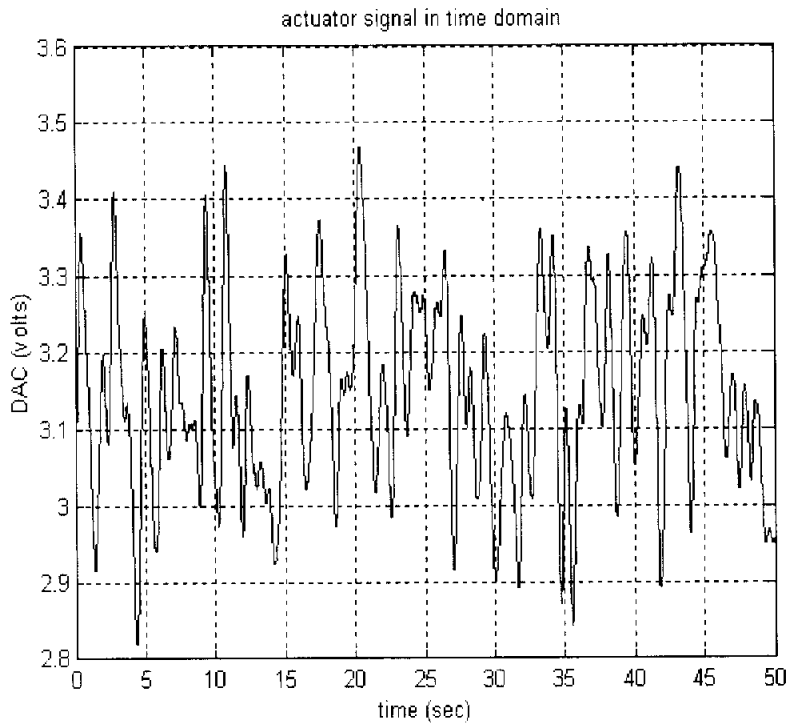


Fig. A.1 Actuator voltage for system identification

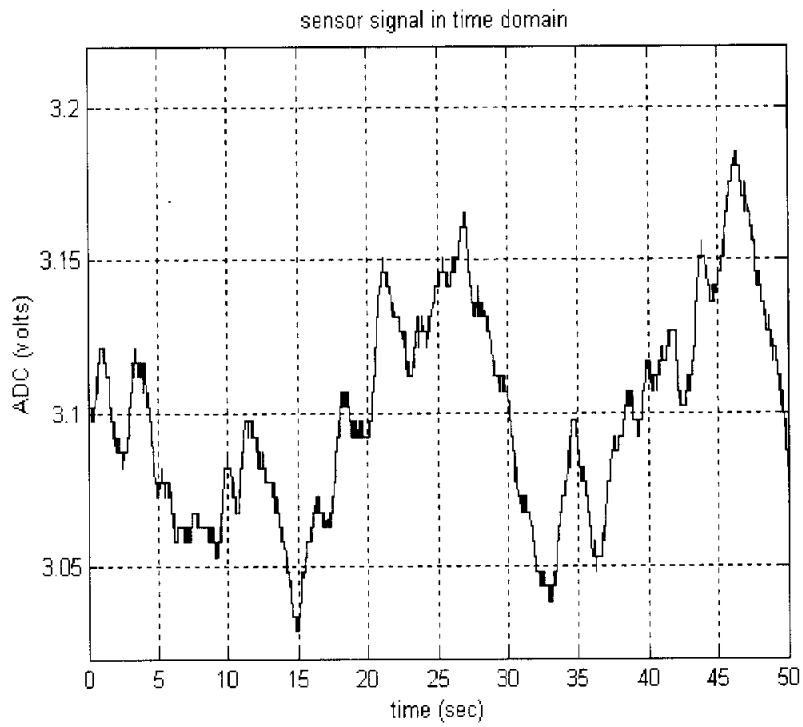


Fig. A.2 Sensor voltage measured by system identification

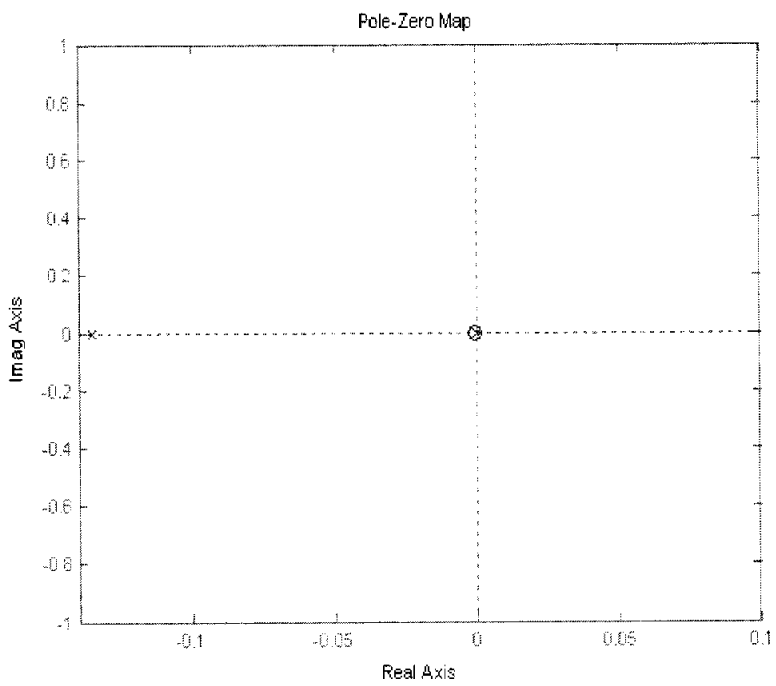


Fig. A.3 Pole-zero map of $P_{DC}(s)$

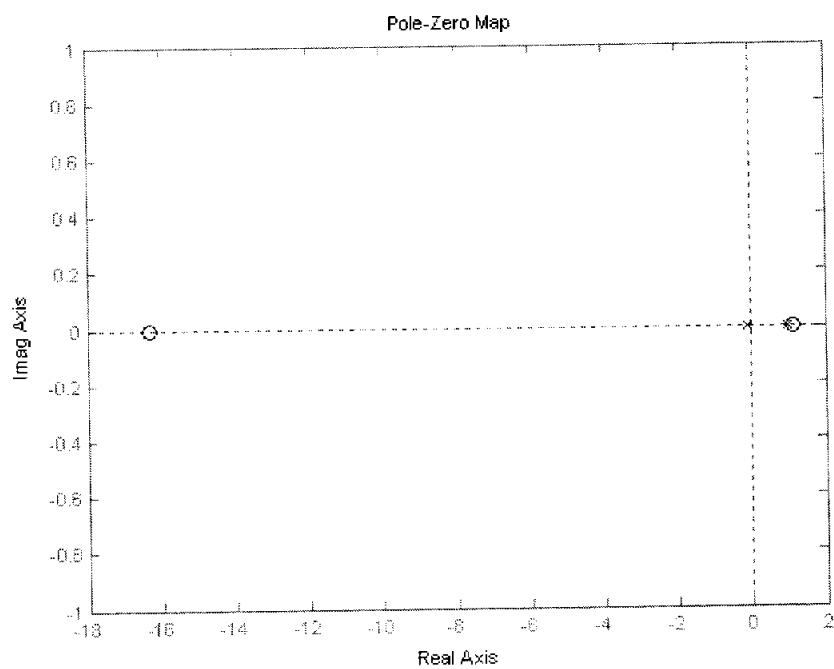


Fig. A.4 Pole-zero map of $P_{id}(z)$

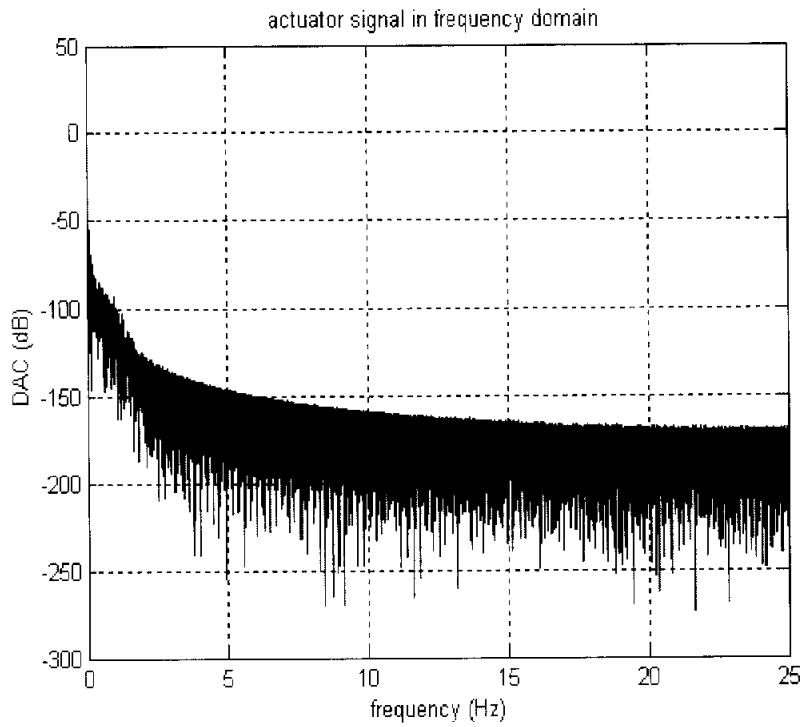


Fig. A.5 Actuator signal in frequency domain

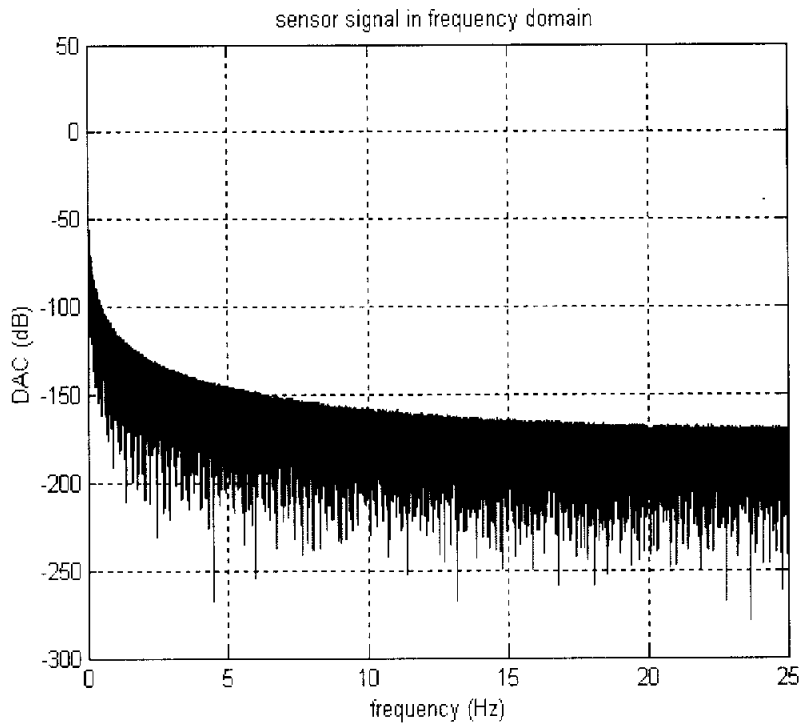


Fig. A.6 Sensor signal in frequency domain

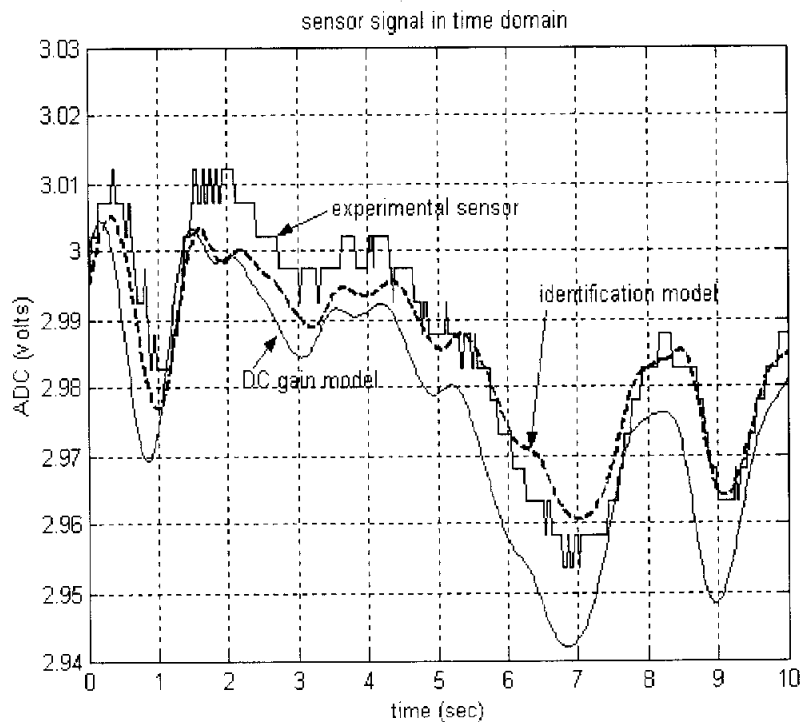


Fig. A.7 Sensor signal through another voltage

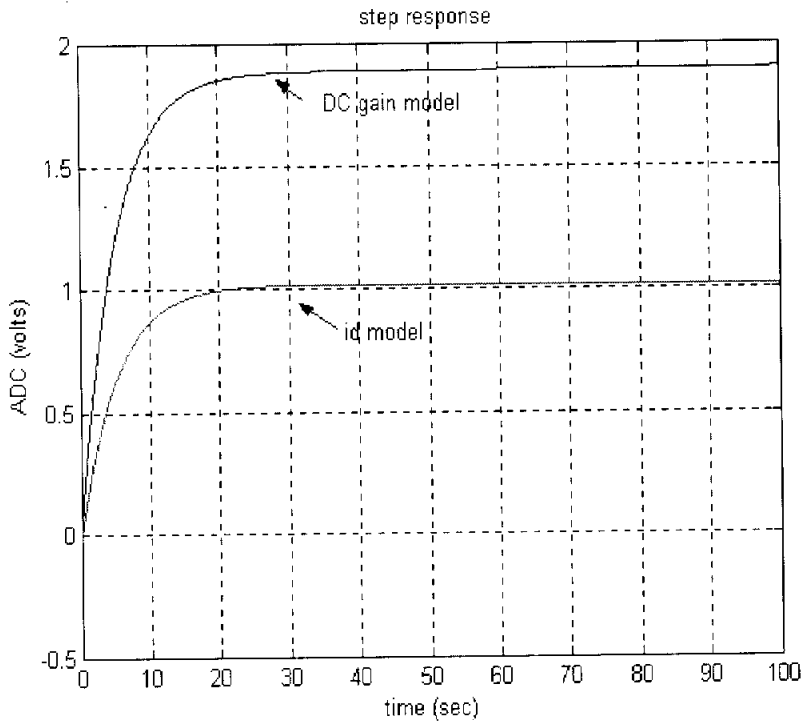


Fig. A.8 Comparison between DC gain model and ID model

부록 B 회로도

Fig. B.1은 전원 회로로서 3.3V와 2.5V는 DSP의 기준(reference) 전원이다. Fig. B.2는 DSP와 CPLD 그리고 각 소자들의 리셋(reset) 회로로써 아날로그 디바이스사(Analog Device)의 ADM708 칩(chip)을 사용하였다. ADM708 칩을 사용하여 안정된 리셋동작을 할 수 있다. Fig. B.3은 ADSP 2191M에 내장된 UART를 사용하여 상위 제어기 또는 PC와 인터페이스(interface) 할 수 있다. Fig. B.4는 여러 가지 Booting mode를 점프로써 결정 할 수 있다. Fig. B.5는 프레쉬 메모리(fresh memory) 회로도이다. Fig. B.6은 아날로그 디바이스사(Analog Device)의 ADSP 2191M 프로세스관련 입출력 회로이다. Fig. B.7과 Fig. B.8은 12bit 분해능(resolution)을 갖는 813JP DA, 7804P AD 컨버터(converter) 회로이다. Fig. B.9는 센서의 입력을 받아서, 잡음을 제거하기 위해 저대역 통과 필터(low pass filter)회로를 구성하였다. Fig. B.10은 외부 장치와 데이터를 교환하기 위한 데이터 버퍼(data buffer) 회로이다.

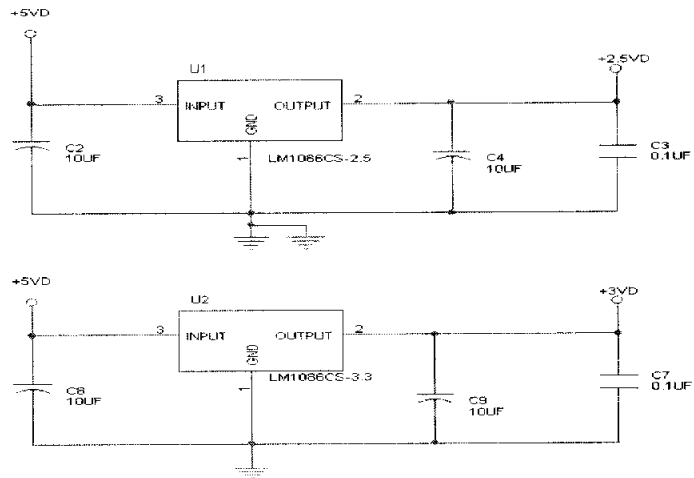


Fig. B.1 Reference voltage

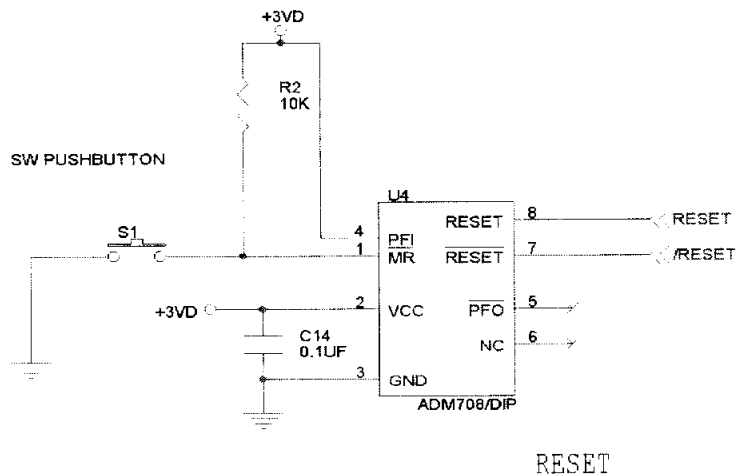


Fig. B.2 Reset circuit

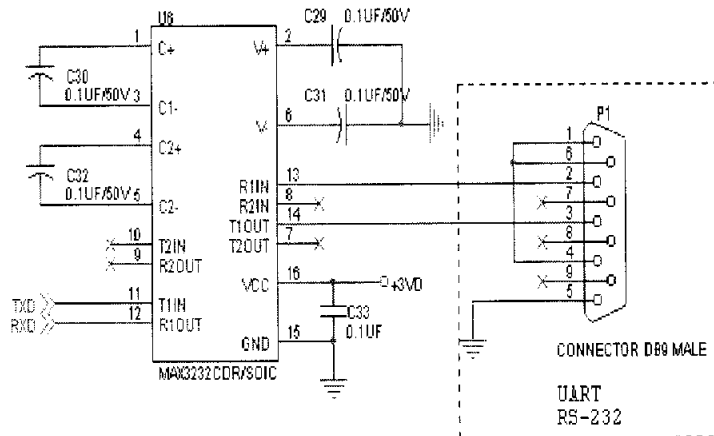


Fig. B.3 RS232C circuit

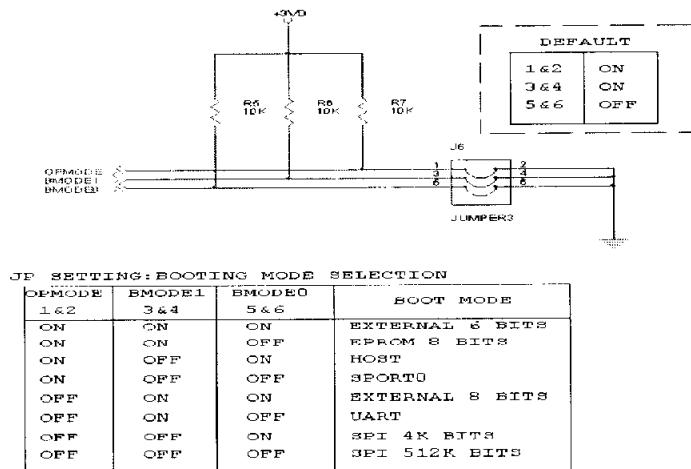


Fig. B.4 Booting mode

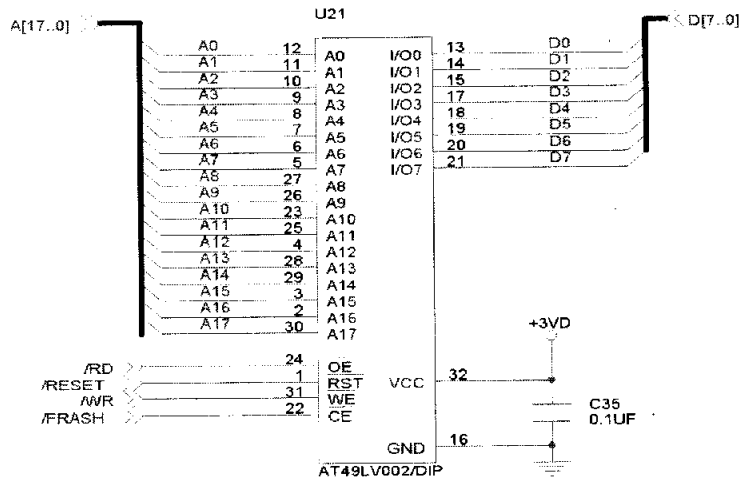


Fig. B.5 fresh memory circuit

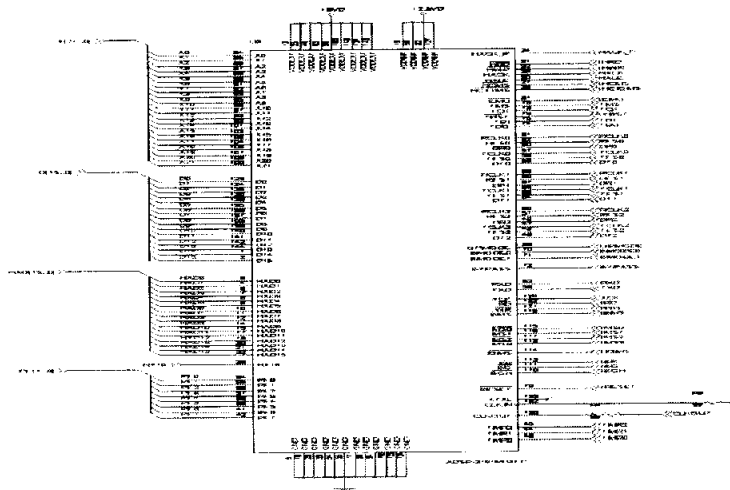


Fig. B.6 ADSP 2191M circuit



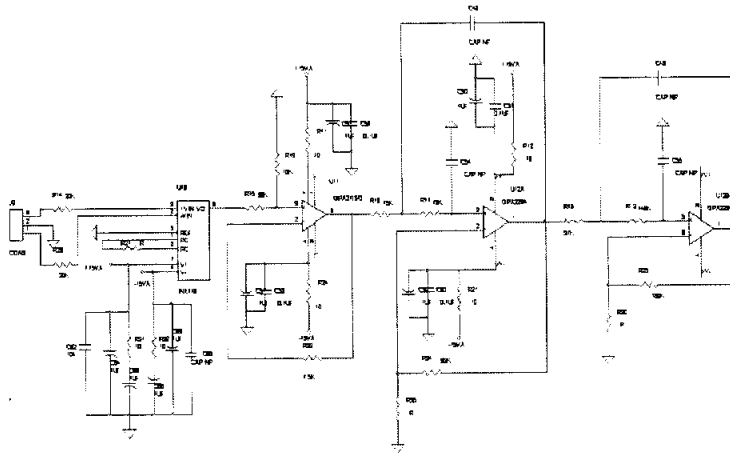


Fig. B.9 Low pass filter circuit

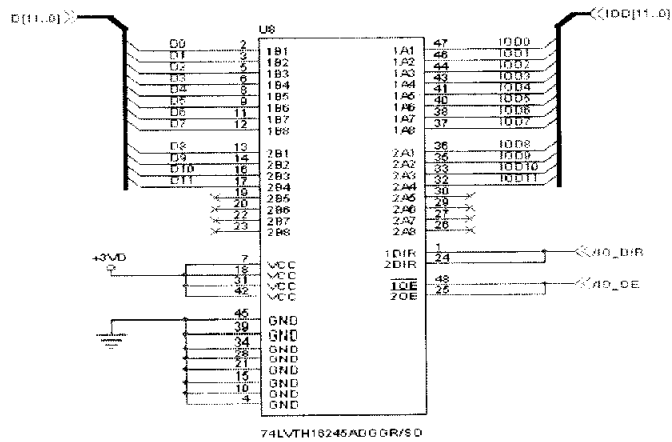


Fig. B.10 Data buffer

부록 C MATLAB PROGRAM

```

clear;
sam_freq=50;
Ts=1/sam_freq;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Unit step response from 0 to 120 sccm
% data are read from the file and converted decimal value from Hex
% value.
% Hex (12 bit unsigned): 000~FFF --> Decimal: 0 ~10
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
fid=fopen('dynamic_1.txt', 'r');
[sam, count] = fread(fid, inf, 'char');
fclose(fid);
fault=0;
dual=0;
k_count=0;
kk=0;
while k_count < count
    k_count=k_count+1;
    if (sam(k_count) ~= 32) & (sam(k_count) ~= 13) & (sam(k_count)
        ~= 10) & (sam(k_count) ~= 9)
        conv=0;
        k_count=k_count-1;
        for k=0: 2
            k_count=k_count+1;
            val=sam(k_count)-48;
            if val > 9
                val=val-7;
            end
        end
    end
end

```

```

        if (val < 0) | (val > 16 )
            fault=1;
        end
        conv=conv*16+val;
    end
    if dual==0;
        kk=kk+1;
        sen(kk)=conv/204.7-10;
        dual= 1;
    else
        act(kk)= conv/204.7-10;
        dual= 0;
    end
end

if fault == 1
    disp(' Hex data is fault')
    break
end

end

clear sam;
% Filtering Noise at the sensor and the actuator signals with the
% 4'rd Butterworth Filters of 10Hz bandwidth
% sampling rate 500Hz
samp_u=250;
[nb, na]=butter(4, 10/samp_u*2);
sen=filter(nb, na, sen);
%act=filter(nb, na, act);
time=(1:kk)/samp_u;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Identification with huristic method
% impulse(Sys),    step(Sys)    fsys=feedback(Sys, 1)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Tss=1/samp_u;
%Num=[0.2 ]*1.88; Den=[1, 0.2 ]; %first order model
Num=[0.2, 0.2e-4]*1.88; Den=[1, 0.2, 0]; %second model
hsys=tf(Num, Den)
dhsys=c2d(hsys, Ts, 'tustin')
[y, t]=step(hsys, 0: Tss: 118);
y=[zeros(499, 1); y]+sen(100);
figure(1)
plot(time(100:kk), act(100:kk), 'b', time(100:kk), sen(100:kk), 'k',
time(100:kk), y(100:kk), 'r')
title('sensor and actuator signal in time domain')
ylabel('volts' );
xlabel('sec');
grid;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Unit step response from 20 to 100 sccm
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
fid=fopen('dynamic_2.txt', 'r');
% Filtering Noise at the sensor and the actuator signals with the
% 4'rd Butterworth Filters of 10Hz bandwidth
% sampling rate 500Hz
samp_u=250;
[nb, na]=butter(4, 10/samp_u*2);
sen=filter(nb, na, sen);
%act=filter(nb, na, act);
time=(1:kk)/samp_u;

[y, t]=step(hsys, 0: Tss: 118);
y=[zeros(499, 1); y]+sen(100);
ky=length(y);

figure(2)
plot(time(100:ky), act(100:ky), 'b', time(100:ky), sen(100:ky), 'k',
time(100:ky), y(100:ky), 'r')
title('sensor and actuator signal in time domain')
ylabel('volts' );
xlabel('sec');
grid;

```

```

%%%%%%%%%%
% data are read from the file and converted decimal value from Hex
% value.
% Hex (12 bit unsigned): 000~FFF --> Decimal: 0 ~10
%%%%%%%%%%
fid=fopen('id_1.txt', 'r');
sums=0;
suma=0;
for k=1:kk
    sums=sums+sen(k);
    suma=suma+act(k);
end
sums_m=sums/kk
suma_m=suma/kk
isen=sen-sums_m;
iact=act-suma_m;
isen=isen';
iact=iact';

```

```

%%%%%%%%%%
% Plot data in the time and the frequency domain
%%%%%%%%%%
time=(1:kk)/sam_freq;
figure(3)
plot(time, sen)
title('sensor signal in time domain')
ylabel('ADC (volts)' );
xlabel('time (sec)');
a1=4096*(1+fix(kk/4096));
ar=a1-kk;
sen=[sen, zeros(1,ar)];
sen=fft(sen);
a2=a1/2;
freq=(1:a2)*sam_freq/a1;
figure(4)
plot(freq, 20*log(abs(sen(1:a2))/kk));
title('sensor signal in frequency domain')
ylabel('DAC (dB)' );
xlabel('frequency (Hz)');
plot(time, act)
title('actuator signal in time domain')
ylabel('DAC (volts)' );
xlabel('time (sec)');
act=[act, zeros(1,ar)];
act=fft(act);
plot(freq, 20*log(abs(act(1:a2))/kk));
title('actuator signal in frequency domain')
ylabel('DAC (dB)' ); xlabel('frequency (Hz)');

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Active Data for System identification of the MFC from
% experiment data
% First order Model of MFC =  $a/(s+b)$ 
% Second order Model of MFC =  $(as+b)/(s^2+c*s)$ 
% Actuator signal Range : -0.5 to 0.5 --> DAC value: 2.1 to 4.1
% --> Piezo volt=17*DAC value
% Sensor signal Range : -0.5 to 0.5 --> ADC value: 2.4 to 4.4 -->
% Mass flow= 0 to 120 sccm
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
z = [isen,iact];
m = arx(z, [2 3 0]); %second order model
idsys=tf(m)
[ni di]=tfdata(idsys(1), 'v');
disp('tustin rule')
idsys=tf(ni, di, Ts);
isys=d2c(idsys,'tustin');
[y1, t]= step(hsys, 0: Ts: 100);
[y2, t]= step(isys, 0: Ts: 100);
figure(7)
plot(t, y1, 'k', t, y2, 'r')
title('step response')
ylabel('ADC (volts)' );
xlabel('time (sec)');
grid;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Conform ID system with another data
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
fid=fopen('id_2.txt', 'r');
sums=0;
suma=0;
for k=1:kk
    sums=sums+sen(k);
    suma=suma+act(k);
end
sums_m=sums/kk
suma_m=suma/kk
isen2=sen-sums_m;
iact2=act-suma_m;
isen2=isen2';
iact2=iact2';
isenid=filter(ni, di, iact2);
[nh dh]=tfdata(dhsys, 'v');
hsenid=filter(nh, dh, iact2);
time=(1:kk)/sam_freq;
figure(8)
plot(time, isen2+3.13, 'k', time, isenid+3.1, 'r', time, hsenid+3.1, 'b')
title('sensor signal in time domain')
ylabel('ADC (volts) ');
xlabel('time (sec)');
grid;

```

감사의 글

또 다른 도전으로 나를 변화시켜야겠다는 생각으로 출발한 공부의 한 장을 마무리 지으며 짧지 않았던 지난 시간들이 주마등처럼 떠오릅니다. 그동안 많은 선택의 과정을 벌리하고 열정을 불어 넣었던 시간이지만 아쉬움이 많이 남는 시점입니다. 이제부터 더욱 폭 넓고 깊이 있는 시간을 보낼 것을 다짐해봅니다.

다시금 공부할 기회를 제공해주시고 학문세계의 여러 가지 가르침을 자상하게 지도해주신 김영수 교수님께 먼저 감사를 드립니다. 본 연구가 진행되는 동안 오후규 교수님, 김종수 교수님, 금종수 교수님, 최광환 교수님, 윤정인 교수님, 김은필 교수님의 따뜻한 말씀이 크나큰 밑거름이 되었습니다. 논문 심사 과정에서 보여주신 정석권 교수님의 애정 어린 세밀한 지도는 지금의 시간을 있게 하였습니다. 삼성전자의 박용종 박사님, 경상대의 박태조 교수님, 이건명 교수님, 최진호 교수님, 삼성전자의 서무교 박사님의 격려는 어려운 순간을 헤쳐 나가는 큰 힘이 되었습니다. 자신의 바쁜 시간을 쪼개어 논문의 완성에 도움을 주신 김인관 학우, 박재홍 학우와도 기쁨을 함께 하고 싶습니다. 그리고 학위 과정 중 깊은 관심을 보여준 조정상 박사님, 황진권 박사님, 양해정 박사님께도 깊이 감사드립니다.

배움이 인생에서 가장 중요한 일임을 늘 가슴에 안고 살게 해주신 아버지 영전에 본 논문을 바치고, 평생을 자식 뒷바라지하며 사회의 큰 일꾼으로 키워주신 어머니, 남편이 세상에서 제일 훌륭한 줄 알고 어려운 시간을 보내면서도 크나큰 버팀목이 된 아내 은순, 한창 대화를 많이 나누어야 할 시기에 혼자서 자신의 시간을 헤쳐 나온 두 아들 수형, 주형, 늘 웃음을 떠나지 않게 해준 막내 서형이, 사위에게 크나큰 사랑을 보여주신 장인의 은혜, 항상 따뜻한 힘이 되어준 남동생 내외, 여동생 내외, 동서 내외를 생각하며 이 작은 결실을 같이 하고 싶습니다.