

적응 PID를 이용한 질량 유량 제어기 구현

Implementation of the Mass Flow Controller using Adaptive PID

조 봉 수*, 백 광 렬

(Bong-Su Cho and Kwang-Ryul Baek)

Abstract : The MFC(Mass Flow Controller) is an equipment that measures and controls mass flow rates of fluid. Most of the MFC system is still using the PID algorithm. The PID algorithm shows superior performance on the MFC system. But the PID algorithm in the MFC system has a few problems as followed. The characteristic of the MFC system is changed according to the operating environment. And, when the piezo valve that uses the control valve is assembled in the MFC system, a coupling error is generated. Therefore, it is very difficult to find out the exact parameters of MFC system. In this paper, we propose adaptive PID algorithm in order to compensate these problems of a traditional PID algorithm. The adaptive PID algorithm estimates the parameters of MFC system using LMS(Least Mean Square) algorithm and calculates the coefficients of PID controller. Besides, adaptive PID algorithm shows better transient response because adaptive PID algorithm includes a feedforward. And we implement MFC system using proposed adaptive PID algorithm with self-tuning and Ziegler and Nichols's method. Finally, comparative analysis of the proposed adaptive PID and the traditional PID is shown.

Keywords : MFC, PID, LMS, adaptive PID

I. 서론

최근 산업이 발달함에 따라, 온도, 압력, 습도뿐만 아니라 유체, 즉 액체와 기체의 흐름에 관한 이동량을 정확하게 측정하는 것은 중요하다. 특히 유체의 질량 유량은 반도체나 LCD등의 생산품의 질을 결정하는 중요한 요소가 되고 있다.

질량 유량 제어기(MFC, Mass Flow Controller)는 외부에서 얻는 설정 유량과 질량 유량계를 사용하여 측정되는 유량을 비교하여 그 차이가 '영(zero)'이 되도록 컨트롤 밸브를 제어하는 시스템이다. 본 논문에서는 열(thermal)식 질량 유량계와 피에조(piezo) 밸브를 사용하여 MFC 시스템을 구현하였다. 질량 유량을 측정하기 위해 온도 및 압력에 관계없이 질량 유량이 측정 가능한 열식 질량 유량계를 정온도차 방식으로 구성하여 사용하였다[1-3]. 그리고 흐르는 유량을 제어하기 위한 컨트롤 밸브는 발열이 없고 응답속도가 빠르며, 온도와 압력에 관계없이 미세한 변위 제어가 가능한 피에조 밸브를 사용하였다[4].

일반적으로, 질량 유량을 제어하기 위해 PID 제어기를 이용한다. MFC에서 PID 제어기는 우수한 성능을 보인다. 하지만 다음과 같은 문제점이 있다.

- 유체가 원형관을 통하여 흐르는 경우, 유체의 유량은 원형관의 입구와 출구의 압력차, 원형관의 단면적, 제어되는 유체의 물리적 특성과 관계가 있다[5]. 그래서 MFC는 MFC의 동작 조건에 따라 시스템의 특성이 변화하게 된다.

- MFC는 컨트롤 밸브로써 피에조 밸브를 사용한다. 피에조 밸브는 히스테리시스(hysteresis)를 포함한 비선형(non-

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2006. 3. 29., 채택확정 : 2006. 10. 30.

조봉수, 백광렬 : 부산대학교 전자과

(mscho97@pusan.ac.kr/krbaek@pusan.ac.kr)

※ 이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

linear) 특성을 가진다[4,6]. 이 비선형 특성으로 인하여 피에조 밸브의 조립 오차는 피에조 밸브의 동특성을 변화시킨다.

이러한 문제점들을 해결하기 위하여, MFC를 구현할 때 모든 MFC마다 각각 다른 제어를 설계해야 한다. 현재 퍼지 제어(fuzzy control), 뉴런 네트워크(neural networks), 룩업 테이블(look-up table)등을 이용한 연구가 진행 중이다 [7-10]. 본 논문은 MFC를 위하여 다음과 같은 셀프 튜닝(self-tuning)을 하는 적응(adaptive) PID 알고리즘을 제안한다. 먼저 시스템의 입출력 데이터를 측정 후 최소자승법(LMS: Least Mean Square) 알고리즘을[11-13] 이용하여 MFC 시스템의 이산 시스템 모델 파라미터와 피드포워드항(feed-forward)을 추정한다. 그리고 추정된 이산 시스템 모델 파라미터를 이용하여 이산 PID 제어기를 설계한다.

본 논문에서 제안하는 적응 PID 제어 알고리즘은 동작하는 시스템의 입출력 데이터를 이용하여 시스템의 파라미터 및 피드포워드항을 추정한다. 그래서 MFC의 동작 조건에 대한 시스템 파라미터 변화를 보정한 PID 제어기가 설계되고, 빠른 시스템응답과 과도 응답(transient response)을 개선하고 피에조 밸브의 비선형 특성을 보정한다[14].

적응 PID 제어기의 성능을 분석하기 위하여 Ziegler & Nichols 방법에 의한 PID 제어기를 설계하여 비교한다. 성능 비교를 위하여 실측한 MFC의 계단 응답(step response)들을 구하였다. 이 실험에 의하면, 본 논문이 제안하는 적응 PID제어 방법이 기존의 Ziegler & Nichols 방법보다 우수한 성능을 나타내는 것을 확인 할 수 있다. 또한 MFC의 동작 조건에 대하여 MFC마다 각각 다른 PID 제어기가 설계되어야 하는 문제점을 해결하였다.

II. PID 제어기 설계

1. Ziegler & Nichols 방법을 이용한 PID 제어기 설계

1942년에 Ziegler와 Nichols가 사전 실험을 통한 PID 제

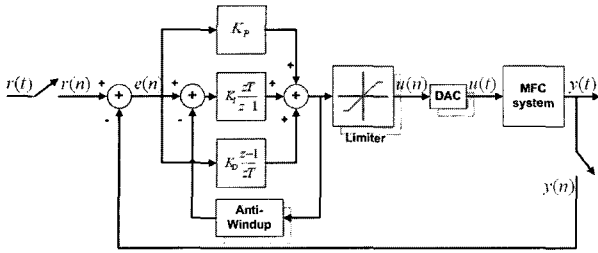


그림 1. PID 제어 시스템.
Fig. 1. PID control system.

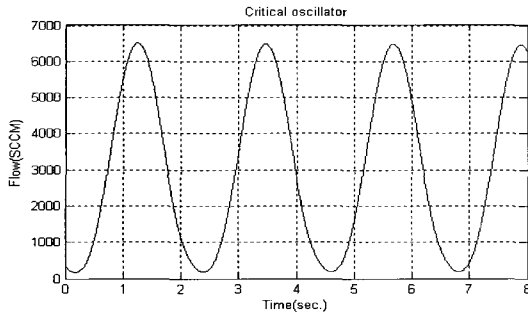


그림 2. MFC 시스템의 임계진동.
Fig. 2. Critical oscillator of MFC system.

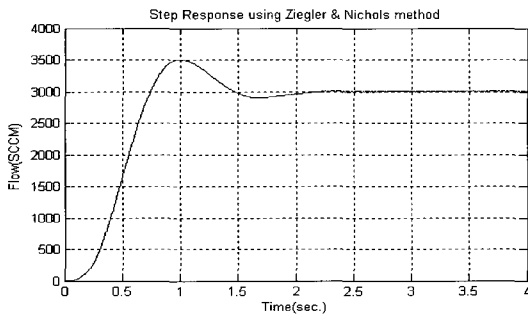


그림 3. PID 제어기를 포함한 MFC 시스템의 계단응답.
Fig. 3. Step response of MFC system included PID controller.

여기 설계방법을 제안하였다. 제어대상 플랜트가 나타내는 과도 응답의 형태로부터 PID제어기의 계수들을 정하는 방법이다[12].

MFC 시스템에 Ziegler & Nichols가 제안한 이 방법을 적용하면 샘플링 주기 0.005sec. (200Hz), 비례 계수 0.4에서 그림 2와 같은 지속진동이 출력에 나타난다.

측정된 임계 주기는 2.235sec. 이므로 이산 PID 계수는 $K_p=0.24$, $K_i=0.001073$, $K_d=13.41$ 가 된다. 그림 3은 기본 실험 조건인 상대기압 2bar, 실험온도 25°C, 질소(nitrogen) 기체에 대한 PID제어기를 포함한 MFC 시스템의 계단 응답 파형이다.

2. Ziegler & Nichols PID 제어기의 문제점

Ziegler & Nichols 가 제안한 방법은 시스템 모델이 없어도 사전 실험을 통하여 PID 제어기를 설계할 수 있는 장점이 있다. 하지만 MFC 시스템에서 시스템의 동작 환경 변화 및 피에조 밸브의 결합 오차 등, 시스템 특성 변화로 인하여 각각의 MFC 시스템마다 다른 PID 제어기를 설계해야

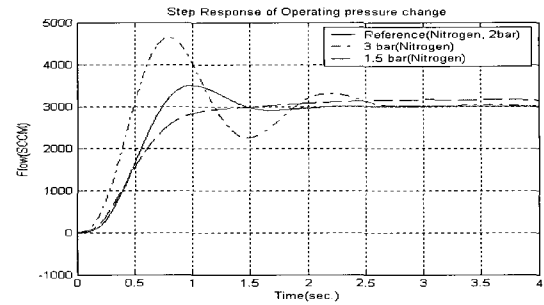


그림 4. 다른 압력차를 적용한 MFC 시스템의 계단응답.
Fig. 4. Step response of MFC system that apply different pressure drop.

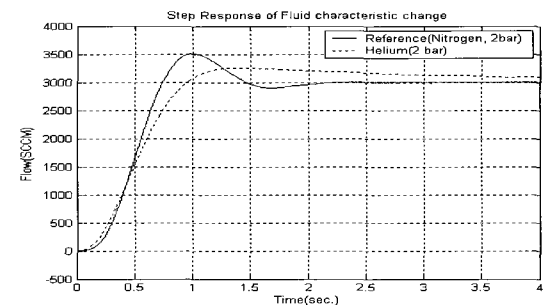


그림 5. 헬륨 기체를 적용한 MFC 시스템의 계단응답.
Fig. 5. Step response of MFC system that apply to helium.

하는 문제가 있다.

2.1 동작 압력의 변화

유체는 레이놀즈수(reynolds number)에 의해 층류(laminar flow)와 난류(turbulent flow)로 구분된다[5]. 열식 질량 유량 계는 층류 상태를 유지하여 유체의 질량 유량을 측정한다 [1]. 유체가 층류상태일 경우, 유량은 원형관의 입·출구 압력차에 비례한다[5]. 따라서 컨트롤 밸브가 같은 단면적으로 열려있을 경우 MFC가 동작하는 압력차에 의해서 흐르는 유량은 바뀌게 된다. 즉 시스템의 특성이 변화한다.

2.2 유체의 특성 변화

유체의 유량은 유체의 물리적 특성과 관계가 있다[5]. 같은 동작 압력, 같은 단면적의 원형관에 유체의 흐름이 있을 경우, 제어되는 유체가 바뀌게 되면 유체의 물리적 특성이 변화하게 되므로 MFC 시스템의 특성이 변화하게 된다.

2.3 피에조 밸브의 결합 오차

피에조 밸브는 압력과 온도에 관계없이 미세한 변위를 제어할 수 있는 장점이 있다. 하지만 히스테리시스를 포함한 비선형 특성을 가지고 있으므로 동작점이 바뀌는 경우 밸브의 동작 특성이 변화한다. 피에조 밸브를 이용하여 10SLM(Standard Liter per Minute)정도의 유량의 제어하기 위해 필요한 변위는 수십 마이크론(um) 정도이고, 피에조 밸브의 최대 변위는 50um이다[4,6]. 피에조 밸브는 그림 6과 같이 약 13개의 부품들의 조립으로 구성된다. 따라서 피에조 밸브가 MFC 시스템에 조립될 때, 5~20um 정도의 결합 오차가 발생한다. 이 오차는 아주 작은 오차이지만 피에조 밸브의 동작점을 바뀌게 하기에는 충분한 오차이다.

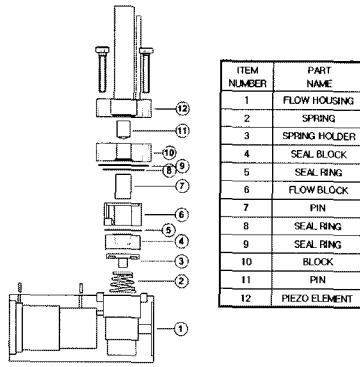


그림 6. 피에조 밸브 부품 전개도.
Fig. 6. Part development figure of piezo valve.

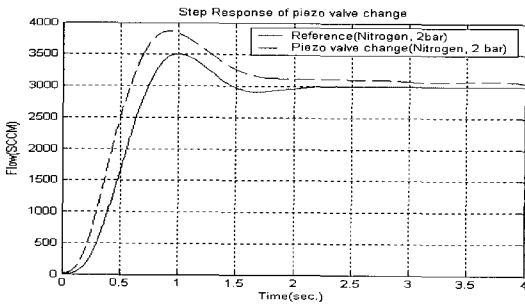


그림 7. 다른 피에조 밸브를 결합한 MFC 시스템의 계단응답.
Fig. 7. Step response of MFC system that is assembled another piezo valve.

III. MFC 시스템 구현

MFC는 원형관에서 유체의 흐름이 있을 경우 열식 질량 유량계를 사용하여 유체의 질량 유량을 측정하고, 컨트롤 밸브를 이용하여 원형관의 단면적을 제어하여 유체의 질량 유량을 제어한다. 그러나 2장에서 이론과 실측을 통하여 유체의 흐름은 여러 외부 환경 변수들에 의해 변화되어 MFC 시스템마다 각각 다른 PID 제어가 요구되는 사실을 확인하였다.

본 논문은 이런 문제점을 해결하기 위해 셸프 튜닝을 하는 적응 PID 제어 알고리즘을 제안한다. 적응 PID 제어 알고리즘은 MFC 시스템 파라미터를 2차 선형함수로 가정하고, LMS 알고리즘을 이용하여 시스템의 이산 모델 파라미터를 추정한다. 그리고 이 추정된 파라미터를 이용하여 PID 계수와 피드포워드항의 계수를 구한다.

1. PID 제어기 설계

MFC 시스템이 2차 선형 시스템으로 근사화 가능하다고 가정을 하고, PID 제어기의 계수들이 (1)로 표현이 된다면, PID 제어기를 포함한 MFC 시스템의 전달함수는 (4)와 같이 1차 함수가 된다. 그래서 PID 제어기를 포함한 MFC 시스템의 폐루프(close-loop) 전달함수는 (5)와 같이 정상상태 이득(steady state gain)이 '일(one)', 시정수(time constant)가 'τ'인 1차 함수가 된다. 따라서 MFC 시스템의 파라미터들이 추정되면 PID제어기는 (3)으로 PID 계수들을 계산하여 설계될 수 있다.

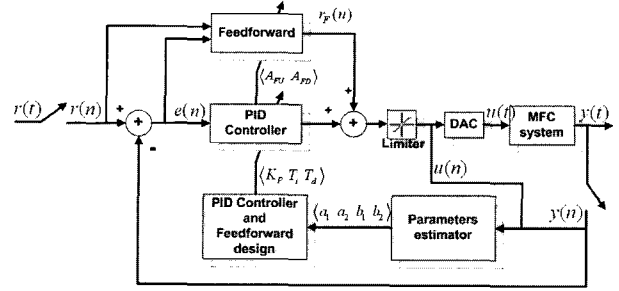


그림 8. 적응 PID 제어를 포함한 MFC 시스템.
Fig. 8. MFC system included adaptive PID controller.

$$G_p(s) = \frac{K}{(p_1s+1)(p_2s+1)} \tag{1}$$

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \tag{2}$$

$$T_d = \frac{p_1 p_2}{p_1 + p_2}, T_i = p_1 + p_2, K_p = \frac{T_i}{K \tau} \tag{3}$$

$$G(s) = \frac{1}{\tau s} \tag{4}$$

$$G_{close-loop}(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)} = \frac{1}{\tau s + 1} \tag{5}$$

2. 적응 PID 알고리즘

적응 PID 제어 알고리즘은 먼저 MFC 시스템의 입출력 데이터를 측정한다. 그리고 최소자승법 알고리즘을 이용하여 MFC 시스템의 이산 모델 파라미터를 추정한다. 시스템 파라미터는 이 추정된 이산 모델 파라미터를 이용하여 계산한다. 그리고 계산된 시스템 모델 파라미터를 이용하여 PID 제어기의 계수와 피드포워드항의 계수를 구한다.

적응 PID 알고리즘은 특정 동작 조건에 대하여 시스템의 입출력 데이터를 측정하여 시스템 파라미터를 추정한다. 그리고 이 추정된 시스템 파라미터를 이용하여 PID 제어기를 설계하기 때문에 MFC 시스템의 동작 조건 변화에 대한 문제점을 보상한다. 또한 실측한 입출력 데이터를 이용하여 추정된 피드포워드항을 이용하기 때문에 MFC 시스템의 응답시간을 빠르게 하고, 입력에 따른 MFC 시스템의 비선형 특성을 보상한다[14,15].

3. 시스템 파라미터 추정

MFC 시스템의 2차로 가정한 연속시간(continuous) 함수인 (6)을 샘플링 주기 T인 이산시간 함수로 변환하게 되면 (7)-(10)에 의해서 (11)이 된다.

$$G_p(s) = \frac{K}{(s + \frac{1}{p_1})(s + \frac{1}{p_2})} \tag{6}$$

$$G_p(z) = Z \left[\frac{1 - e^{-Ts}}{s} G_p(s) \right] = (1 - z^{-1}) Z \left[\frac{G_p(s)}{s} \right] \tag{7}$$

$$G_p(z) = \frac{z-1}{z} Z \left[\frac{K}{s} - \frac{p_1 K}{p_1 - p_2} \frac{1}{s+1/p_1} + \frac{p_2 K}{p_1 - p_2} \frac{1}{s+1/p_2} \right] \tag{8}$$

$$G_p(z) = \frac{z-1}{z} \mathbb{Z} \left[K - \frac{p_1 K}{p_1 - p_2} e^{-\frac{1}{p_1}} + \frac{p_2 K}{p_1 - p_2} e^{-\frac{1}{p_2}} \right] \quad (9)$$

$$G_p(z) = \frac{z-1}{z} \left[K \frac{z}{z-1} - \frac{p_1 K}{p_1 - p_2} \frac{z}{z - e^{-1/p_1}} + \frac{p_2 K}{p_1 - p_2} \frac{z}{z - e^{-1/p_2}} \right] \quad (10)$$

$$G_p(z) = \frac{b_1 z + b_2}{z^2 - a_1 z - a_2} \quad (11)$$

$$y[n] = a_1 y[n-1] + a_2 y[n-2] + b_1 u[n-1] + b_2 u[n-2] \quad (12)$$

단, $a_1 = e^{-T/p_1} + e^{-T/p_2}$, $a_2 = -e^{-(T/p_1 + T/p_2)}$

$$b_1 = K(-a_1 - c + 1), \quad b_2 = K(-a_2 + c)$$

$$c = \frac{p_2 e^{-T/p_1} - p_1 e^{-T/p_2}}{p_1 - p_2}$$

이산시간 전달 함수의 파라미터인 a_1, a_2, b_1, b_2 를 구하기 위해 MFC 시스템의 입출력 데이터를 측정하여 최소자승법을 적용한다. 시스템의 이산시간 파라미터를 (13)과 같은 벡터로 정의하고, 시스템의 입출력 데이터를 (14)와 같은 벡터로 정의한다. 시스템의 이산시간 파라미터는 최소자승법을 이용하여 계산하면 (15)가 된다.

$$\theta = [a_1 \ a_2 \ b_1 \ b_2]^T \quad (13)$$

$$f^T[k] = [y[k-1] \ y[k-2] \ u[k-1] \ u[k-2]] \quad (14)$$

$$\hat{\theta} = [F^T[N]F[N]]^{-1} F^T[N]y[N] \quad (15)$$

단, $y[N] = [y[2] \ y[3] \ \dots \ y[N]]^T$

$$F[N] = [f^T[2] \ f^T[3] \ \dots \ f^T[N]]^T$$

(15)에서 시스템의 이산시간 파라미터를 구하기 위해 많은 성분을 가지는 벡터 연산을 수행해야 한다. 연산량을 줄이기 위해 재귀최소자승법(RLMS: Recursive Least Mean Square)을 이용한다[11-13]. 재귀최소자승법을 이용하면 시스템의 이산시간 계수는 최종적으로 다음 식과 같이 된다. (17)에서 나타나는 역행렬은 계산을 하면 스칼라(scalar)에 대한 역행렬이므로 연산량과는 상관없다.

$$P[N] = [F^T[N]F[N]]^{-1} \quad (16)$$

$$L[N+1] = P[N]f[N+1][1 + f^T[N+1]P[N]f[N+1]]^{-1} \quad (17)$$

$$\hat{\theta}[N+1] = \hat{\theta}[N] + L[N+1][y[N+1] - f^T[N+1]\hat{\theta}[N]] \quad (18)$$

$$P[N+1] = P[N] - L[N+1]f^T[N+1]P[N] \quad (19)$$

시스템의 파라미터는 (18)로 추정된 이산시간 파라미터를 이용하여 (20)으로 구해진다. (20)은 (11)의 a_1, a_2 를 이용하여 p_1, p_2 를 구하고 b_1, b_2 를 더하여 K 를 구한다. 그리고 (3)을 이용하여 PID 계수를 구한다.

$$p_1 = -\frac{T}{\ln r_1}, \quad p_2 = -\frac{T}{\ln r_2}, \quad K = \frac{b_1 + b_2}{1 - a_1 - a_2} \quad (20)$$

$$\text{단, } r_1, r_2 = \frac{a_1 \pm \sqrt{a_1^2 + 4a_2}}{2}$$

4. 피드포워드 추정

MFC 시스템은 세라믹피에조를 여러장 적층한 막대형 피에조 밸브를 사용한다. 피에조 밸브는 그림 9와 같이 증가, 감소 곡선이 다른 히스테리시스 특성을 가진다. 본 논문에서는 피드포워드를 추정하기 위해 피에조 밸브의 개루프(open-loop) 특성을 1차 선형증가(linear-up) 모델(model)과 1차 선형감소(linear-down) 모델로 가정하였다. 그림 9는 여러 입력 α_k, β_k 에 대한 피에조 밸브의 히스테리시스 곡선이다.

(21)과 (22)는 단조 증가와 단조 감소하는 경우에 대한 본 논문에서 가정한 1차 선형모델이다.

$$y(n) = A_{FU}(r_f(n) - n_0) + y(n_0) \quad (21)$$

$$y(n) = A_{FD}(r_f(n) - n_0) + y(n_0) \quad (22)$$

단, A_{FU} : 두점 $(n_0, y(n_0)), (\alpha_k, y(\alpha_k))$ 를 잇는 직선의 기울기

A_{FD} : 두점 $(\beta_k, y(\beta_k)), (n_0, y(n_0))$ 를 잇는 직선의 기울기

여기서 n_0 는 현재 입력값이며, α_k, β_k 는 증가와 감소가 변화하는 값이다. 즉 α_0, β_0 는 주(major) 히스테리시스 곡선의 최대, 최소 입력값이며, α_k, β_k 는 k번째(k-order) 부(minor) 히스테리시스 곡선의 최대, 최소 입력값이다.

피드포워드를 추정하기 위해 먼저 실측한 데이터를 이용하여 주 히스테리시스 곡선의 입력과 출력값을 저장하였다. 이후 MFC가 다른 요구되는 출력 $y_d(n)$ 으로 제어되면, 에러가 1% 미만인 경우의 실측한 입력과 증가, 감소 상태를 확인하여 k번째 부 히스테리시스 곡선들의 α_k, β_k 값들을 결정하여 본 논문에서 가정한 1차 선형모델들을 계수를 구하였다. 여기서 에러가 1% 이상인 경우, 출력이 단조 증가 혹은 단조 감소하는 경우로 가정을 하였다.

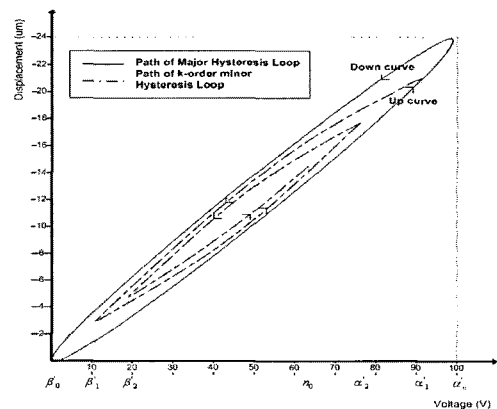


그림 9. 여러 입력 α_k, β_k 에 대한 피에조 밸브의 히스테리시스 곡선.

Fig. 9. Hysteresis loop of a piezo valve showing several input value α_k, β_k .

IV. MFC 시스템 구현

1. 전체 시스템

MFC는 기구부, 측정부, 컨트롤 밸브부, 제어 및 신호처리부로 구성된다. 그림 10은 구현된 MFC 시스템이다.

2. 세부 시스템

2.1 기구부

MFC 시스템에서 유체 공급원으로부터 유체가 공급될 때 공급되는 유체가 난류인 상태이면 정확한 유량을 측정

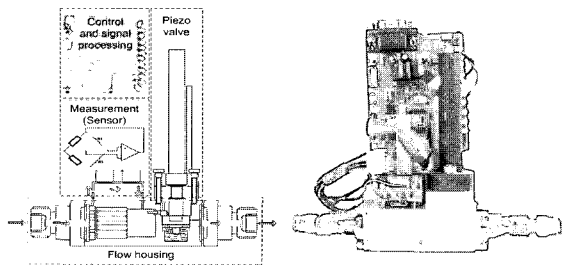


그림 10. 구현된 MFC 시스템.
Fig. 10. Implemented MFC system.

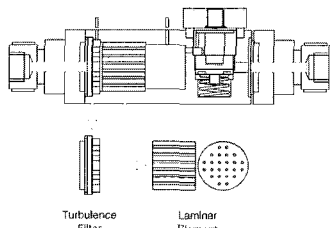


그림 11. 난류필터와 층류소자를 포함한 기구부.
Fig. 11. Flow housing included turbulence filter and laminar element.

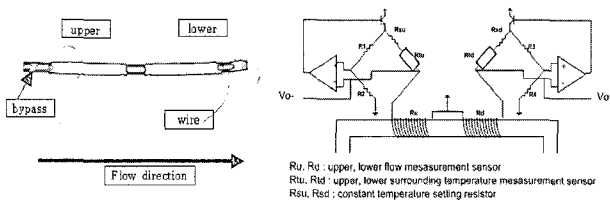


그림 12. 열식 질량 유량 센서.
Fig. 12. Thermal mass flow meter.

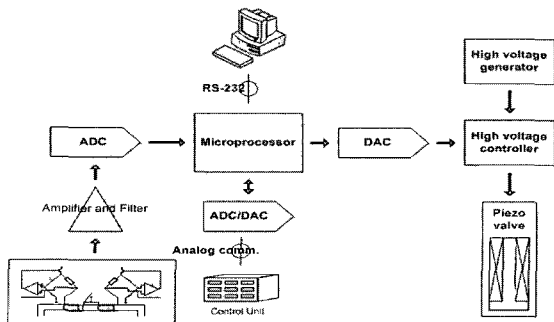


그림 13. 제어 및 신호 처리 블록도.
Fig. 13. Control and signal processing block diagram.

할 수 없다[4]. MFC에서 유량을 측정하기 위한 바이패스관 (bypass capillary)에 흐르는 유체는 충분한 직관부가 구성되어 있는 항상 레이놀즈수가 3000 이상인 층류상태로 유체가 흐른다. 하지만 유체가 흐르는 주관로(main tube)는 단면적에 비하여 충분한 직관부를 구성되지 못해 난류상태의 유체의 흐름이 나타난다. 따라서 기구부를 구성할 때 유체가 들어오는 입구에 난류필터를 설치하여 1차적으로 유체의 흐름을 안정화 시키고 주관로에 층류소자를 설치하여 주관로의 유체를 항상 층류상태로 유지해야한다[1].

2.2 측정부

질량 유량을 측정하기 위해 린텍사의 열식 질량 유량 센서를 외부 회로와 연결하여 정온도차식으로 센서를 구성하였다. 이 열식 질량 유량 센서는 바이패스관에 백금을 코일처럼 감아서 히터 및 센서로서 사용하므로 히터가 따로 필요 없는 장점이 있다[1-3].

2.3 컨트롤 밸브

컨트롤 밸브는 막대형 피에조 밸브를 사용하였다. 피에조 밸브는 압력과 온도등 주변의 영향을 거의 받지 않고 미세한 변위 제어가 가능한 장점이 있다. 응답 속도 또한 1s 미만으로 빠른 응답 시간을 가지고 있다.

2.4 제어 및 신호 처리부

센서부에서 검출되는 신호는 수 mV의 아날로그 신호이다. 신호처리부는 이 센서의 신호를 증폭하고 필터링하는 아날로그 회로와 이를 디지털 신호를 변환시켜주는 ADC가 구성되어 있다. 또한 외부 장치들과 아날로그 및 디지털 통신을 하기 위한 회로가 구성되어 있다. 제어부는 피에조 밸브가 0~130V 정도의 고전압에서 동작을 하므로 고전압을 발생하고 이 고전압을 제어할 수 있는 회로와, 디지털 제어 알고리즘을 수행하고 전체 회로를 제어하기 위한 마이크로 프로세서를 포함하고 있다.

V. 실험

1. 실험 준비

본 논문에서는 유체의 질량 유량을 제어하는 실험을 위

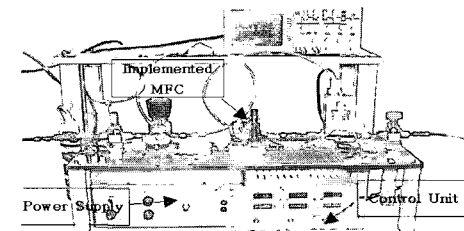
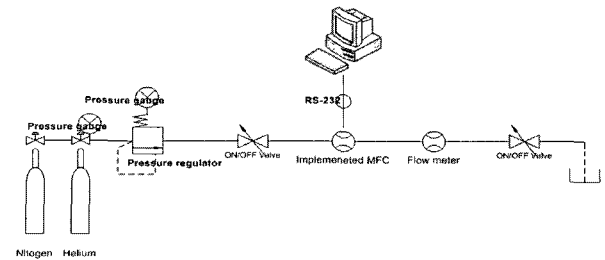


그림 14. MFC 실험 장치.
Fig. 14. Experiment equipment of MFC.

해 질소와 헬륨 두 가지 기체를 사용하였다. 제어되는 기체의 질량 유량은 린텍사의 질량유량계를 이용하여 측정하였다. 동작 압력 변동 실험은 입구측에 압력조절기(pressure regulator)를 연결하여 실험을 하였다. 센서에서 측정되는 유량은 16bit ADC를 이용하여 디지털 신호로 변환한 후 PC와 RS232 통신으로 데이터를 획득하였다. 기본적인 실험 환경은 유체는 질소 기체를 이용하였고, 상대 압력과 실험 온도는 각각 2bar, 25°C를 유지하였다. 동작 환경 변화에 따른 실험을 위해 각각의 요소들 중 한 가지 변수만 변화를 주어 실험하였다.

2. 실험

본 논문에서 제안된 적응 PID 알고리즘을 적용한 MFC 시스템의 계단 응답은 그림 15이다. 적응 PID 제어기와

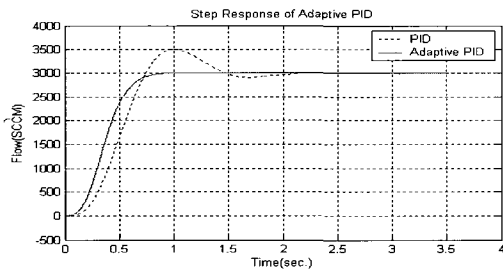


그림 15. 적응 PID제어기의 계단 응답.

Fig. 15. Step response of adaptive PID controller.

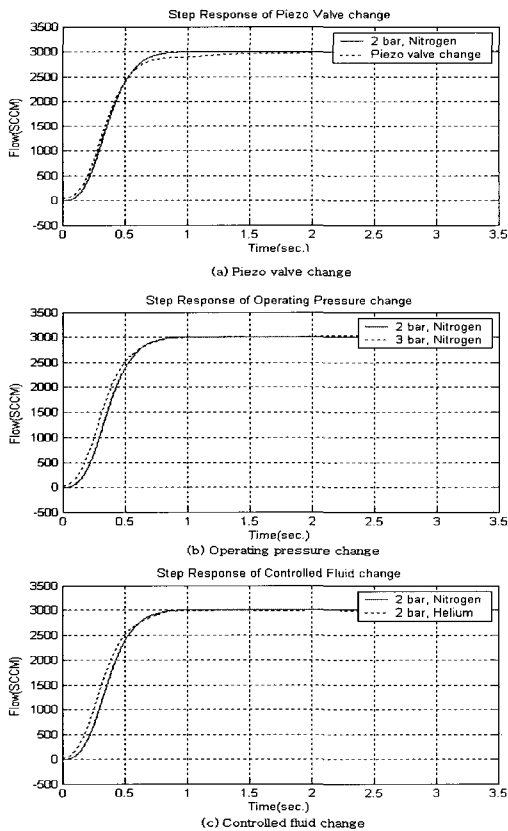


그림 16. 다른 동작 조건을 적용한 적응 PID 제어기의 계단 응답.

Fig. 16. Step response of adaptive PID controller with different operating condition.

Ziegler-Nichols 방법으로 설계된 PID제어기를 적용한 MFC 시스템의 계단 응답을 비교해 보면, 적응 PID 제어기는 피드포워드항을 추가하여 Ziegler-Nichols 방법에 의한 PID 제어기보다 빠른 응답 속도와 개선된 과도 응답을 확인할 수 있다.

그림 16는 MFC 시스템의 동작 조건을 바꾸었을 경우에 대한 적응 PID 제어 알고리즘을 적용한 MFC 시스템의 계단 응답이다. Ziegler-Nichols 방법에 의한 PID 제어기는 동작 조건이 바뀌었을 경우 다시 PID 제어기를 설계해야 하는 문제점이 있었지만, 본 논문에서 제안한 적응 PID 제어기는 시스템의 입출력 데이터를 이용하여 셀프튜닝을 하기 때문에 동작 조건이 변화하여도 거의 일정한 계단 응답을 나타낸다.

VI. 결론

유체의 이동량을 측정하고 제어하는 것은 최근 여러 분야에서 중요하게 인식되고 있어 보다 빠르고 정밀한 MFC가 필요하다.

본 논문에서는 정온도차 방식 열식 질량 유량 센서와 피에조 밸브를 이용하여 MFC 시스템을 구현하였다. 일반적으로 MFC 시스템에 사용되는 PID 제어알고리즘은 다음과 같은 동작 조건 변화를 보상하기 위해서는 새로운 PID 제어기를 설계해야한다.

- MFC 시스템의 입구와 출구의 동작 압력차
- 제어되는 유체의 특성 변화, 즉 제어되는 유체 변화
- 피에조 밸브의 조립 오차
- 단면적에 대한 유량의 비선형성

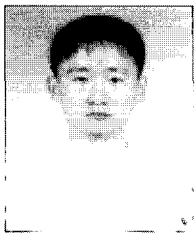
본 논문에서는 기존 PID 제어 알고리즘의 이런 문제점을 개선하기위해 셀프 튜닝을 하는 적응 PID 제어 알고리즘을 제안하고, 이 적응 PID 제어 알고리즘을 MFC 시스템에 적용했다.

본 논문에서 제안한 적응 PID 제어 알고리즘의 성능 분석을 위하여 기존의 Ziegler-Nichols 방법에 의한 PID 제어기와 비교하면 적응 PID 제어기는 측정된 입출력 데이터를 이용하여 계산된 피드포워드항을 추가하여 기존의 PID 제어기보다 개선된 과도 응답 특성을 나타낸다. 그리고 추정된 시스템 파라미터를 이용하여 셀프 튜닝을 하여 PID 제어기를 설계하기 때문에 기존의 PID 제어기에서 나타나는 특정 동작 조건 변화에 대하여 새로운 PID 제어기를 설계해야하는 문제를 해결했다.

참고문헌

- [1] 사단법인 일본계량기기공업연합회, *유량계측 A to Z*, 자동제어계측사, pp. 171-180, 1997.
- [2] 최성현, *가스 측정용 질량 유량계의 원리 · 구조와 적용*, 제어계측, 자동제어계측사, pp. 37-39, 2003. 11.
- [3] Y. Isoda, *정온도차 제어방식 열식 질량 유량계*, 제어계측, 자동제어계측사, pp. 86-89, 2001. 11.
- [4] Piezosystem inc., <http://www.piezo.com/>
- [5] G. Mohamed, *Flow Control*, Cambridge University Press. 2000.

- [6] J. M. T. A. Han, L. Willem, and B. Reinder, "Modeling piezoelectric actuators," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, vol. 5, no. 4, pp. 331-341, Dec. 2002.
- [7] "Self-learning fuzzy logic system for in situ, in-process diagnostics of mass flow controller (MFC)" *IEEE Trans. Semi. Manufacturing*, vol. 7, no. 1, Feb. 1994.
- [8] F. Nadi, A. M. Agogino, and D. A. Hodges, "Use of influence diagrams and neural networks in modeling semiconductor manufacturing processes," *IEEE Trans. on Semi. Manufacturing*, vol. 4, no. 1, pp. 52-58, Feb. 1991.
- [9] 이명희, 정원철, "하이브리드형 질량 유량 제어기의 설계 및 실현," *산학 기술 학회 논문지* vol. 4, no. 2, pp. 63-70, 2003.
- [10] 이석기, 이연정, 이승하, "MFC의 퍼지 제어기 구현," *퍼지 및 지능시스템학회 논문지*, vol. 14, no. 5, pp. 648-654, 2004.
- [11] R. N. Bateson, *Introduction to Control System Technology*, Prentice Hall, Inc., pp. 118-140.
- [12] C. L. Phillips and H. T. Nagle, *Digital Control System Analysis and Design*, Prentice Hall, Inc., pp. 404-413, 1995.
- [13] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, Prentice Hall, Inc., pp. 610-635, 2002.
- [14] M. Hamdan and Z. Gao, "A novel PID controller for pneumatic proportional valves with hysteresis," *IEEE*, pp. 1198-1201, 2000.
- [15] P. Ge and M. Jouaneh, "Modeling hysteresis in piezoceramic actuators," *Precision Engineering*, vol. 17, pp. 211-221, 1995.
- [16] H. Kaoru and E. Masayoshi, "Stainless steel-based integrated mass-flow controller for reactive and corrosive gases.," *Sensors and Actuators*, pp. 33-38, 2002.
- [17] J. Schuurmans and T. Jones, "Control of mass flow in a hot strip mill using model predictive control.," *Proc. of the 2002 IEEE int. Conf. on Control Applications*, pp. 18-20, 2002.



조 봉 수

2004년 부산대학교 전자과 졸업. 2006년 부산대학교 전자과 석사. 2006년~현재 부산대학교 전자과 박사과정 및 정보 통신 연구소 연구원. 관심분야는 신호처리 및 제어.

백 광 렬

제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제 5 권 제 1 호 참조.