

MFC의 퍼지제어기 구현

Implementation of Fuzzy Controller for MFC

이석기* · 이연정** · 이승하***

Seok-Ki Lee, Yun-Jung Lee and Seung-Ha Lee

* 한국원자력연구소 양성자기반공학기술개발사업단

** 경북대학교 전자전기컴퓨터학부

요 약

반도체 제조 장비에서 가스의 질량 흐름 제어기(Mass Flow Controller: MFC)가 차지하는 비중은 매우 크다. 가스의 흐름 제어가 곧 반도체 소자의 품질 및 수율을 결정하는 중요한 요소이기 때문이다. 따라서 MFC의 고속, 고정밀 제어를 구현하기 위한 요구가 높아지고 있다. MFC의 제어 알고리즘에 관한 연구 선례는 찾아보기가 매우 힘들다. 그러나 일반적으로 PID 제어 알고리즘을 사용되는 것으로 알려지고 있다. MFC 제어의 어려움은 열에 의해 흐름을 감지하는 시스템일 경우, 느린 응답 특성과 비선형성을 포함한다는 데 있다. 본 논문에서는 기존의 PID 알고리즘 보다 더 우수한 성능을 보이는 MFC 제어 알고리즘을 제시하고 실험을 통해 그 우수성을 보인다. 비선형성과 느린 응답 특성을 보상하기 위하여 퍼지제어 알고리즘을 적용하였으며 그 성능을 현재 상용화된 제품과 비교하였다. 본 논문에서 제안한 알고리즘은 PC와 PC에 장착된 데이터 획득 보드를 통하여 제어루프를 형성하였고, PC상에서 LabWindows/CVI 프로그램으로 제어알고리즘을 구현하였다. 또한, 느린 응답 특성이 존재하는 센서출력으로부터 실제의 흐름을 추정하는 하나의 방법도 제시하였다. 실험결과, 본 논문에서 제안하는 알고리즘이 기존의 제품보다 더 빠르고, 더 정확한 제어성능을 보였다.

Abstract

The Mass Flow Controller(MFC) has become crucial in semiconductor manufacturing equipments. It is an important element because the quality and the yield of a semiconductor process are decided by the accurate flow control of gas. Therefore, the demand for implementing the high speed and the highly accurate control of MFCs has been increasing. It is hard to find an article of the control algorithm applied to MFCs. But, it is known that commercially available MFCs adopt PID control algorithms. Particularly, when the system detects the flow by way of heat transfer, the MFC control problem includes the slow response and the nonlinearity. In this paper, MFC control algorithm with a superior performance to the conventional PID algorithm is discussed and the superiority is demonstrated through the experiment. A fuzzy controller was utilized in order to compensate the nonlinearity and the slow response, and the performance is compared with that of an MFC currently available in the market. The control system, in this paper, consists of a personal computer, the data acquisition board and the control algorithm carried out by LabWindows/CVI program on the PC. In addition, a method of estimating the actual flow from the sensor output with the slow response is presented. In conclusion, according to the result of the experiment, the proposed algorithm shows better accuracy and is faster than the conventional controller.

Key Words : 질량 흐름 제어기, 퍼지제어, PID제어, 반도체 제조.

1. 서 론

최근 산업이 발전함에 따라, 고정밀성과 고정확성을 요구하고 있다. 특히 에치, 퍼니스, 화학기상증착(Chemical Vapor Deposition: CVD), 웨스트레이션 등 반도체 제조공정에서는 정밀성에 따라, 제품의 질이 결정된다고 볼 수 있다. 따라서 이들 장비에 필수적으로 사용되는 질량 흐름 제어기(Mass Flow Controller: MFC)의 중요성이 높아지고 있다 [1-3]. MFC는 산소, 질소 등 특정한 가스를 사용자가 원하

는 유량만큼 흐르도록 정밀하고 정확하게 조절하여 주고, 흐르는 유량을 표시할 수 있는 조절밸브이다.

MFC의 제어 알고리즘에 관한 연구선례는 찾아보기가 매우 힘들다. 그러나 일반적으로 PID를 적용한 알고리즘이 사용되는 것으로 알려져 있다. 하지만 솔레노이드 밸브나 열에 의해 흐름을 감지하는 흐름센서는 시간지연과 비선형성을 포함하므로 정확한 유량을 측정하기가 어렵다 [1-4][8-11]. 따라서 Tomas를 시초로 지금까지 소수의 연구자들이 흐름센서에서의 열전달 현상에 대한 연구를 진행해 왔다. Komiya[8]는 축방향의 1차원 해석해를 제시 했으며 Tison[9-10]은 질량 유량에 따른 히터의 업스트림과 다운스트림에서 흐름센서의 온도 차이에 대한 관계식을 1차원 해석으로 표현하였다. 또한 이와는 다르게 Hinkle[4]과 Rudent[11]는 2차원으로 각각 수치해와 해석해를 제시하였

* : 교신저자

접수일자 : 2004년 3월 19일

완료일자 : 2004년 7월 19일

다. 하지만 이들은 몇 가지 가정을 이용하여 MFC의 흐름센서에서 일어나는 열전달 문제를 해석한 것으로서 제어 알고리즘 자체에 관한 문헌은 찾아보기 힘들다.

본 논문에서는 전통적인 PID 제어 알고리즘보다 우수한 성능을 가지며 수학적 모델링이 필요 없는 퍼지제어 알고리즘을 제안하고 그 우수성을 실험을 통하여 증명한다. 또한 느린 응답특성을 포함하는 센서 출력으로부터 실제의 흐름을 추정하기 위해 보상기를 제시한다. 마지막으로 퍼지제어 알고리즘과 보상기를 현재 상용화된 제품과 비교하여 그 성능의 우수함을 보인다.

2. MFC 제어 시스템

2.1 MFC의 개요

MFC는 반도체 제조공정에서 가스의 흐름을 정밀하고 정확하게 조절해 주는 장치로서 퍼니스, CVD, 웨트스테이션 등에 많이 사용한다. 그림 1은 실제의 CVD 공정에서 사용되고 있는 MFC의 모습이다.

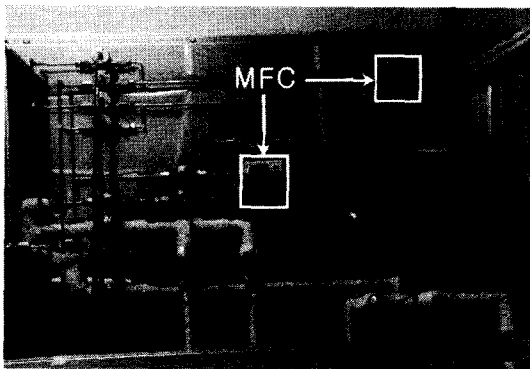


그림 1. CVD 공정의 일부분.
Fig. 1. A part of CVD progress.

일반적인 MFC의 내부 구조는 그림 2와 같이 메인튜브, 센서튜브, 흐름센서, 제어밸브 그리고 회로보드로 구성된다. 각각의 기능을 살펴보면, 메인튜브는 MFC의 주요 가스흐름 통로이며 튜브 내부의 층류소자에 따라 유량범위를 결정한다. 센서튜브는 메인튜브에 대하여 일정한 비율(예를 들어 100:1)의 가스흐름이 형성되도록 한다. 흐름센서는 센서튜브에 열을 가하면서 동시에 온도를 측정하기 위한 코일이 감겨져 있어 유량의 크기에 비례하는 코일의 온도변화를 측정하여 전기적 신호로 변환한다. 제어밸브는 세라믹이나 솔레노이드 및 열식 액추에이터에 의해 동작하며 흐름을 조절한다. 회로보드는 흐름센서에서 측정된 전기적 신호를 입력받아 적절한 밸브개폐 정도에 해당하는 출력을 결정한다 [2-4]. 최근에는 반도체 제조기술의 발달로 마이크로 흐름센서[5]를 사용하거나 통합형 마이크로 흐름 제어 시스템[6-7]을 사용하기도 한다.

그림 3은 열전도에 의해 가스의 흐름을 측정하는 흐름센서의 기본적인 동작방식을 설명한다. 센서튜브를 통하여 가스가 흐르면, 흐름센서에는 업스트림과 다운 스트림으로 불리는 두 개의 센싱 코일이 감겨져 있고 여기에 전류를 인가하면 자기 발열 저항체에 의해 센서튜브가 가열이 된다. 이 튜브를 통하여 메인튜브의 흐름에 비례하는 양의 가스가 흐

르면 두 코일에는 온도 차이가 발생한다. 즉 두 코일 모두 온도가 동일하면 가스의 흐름이 없다는 것을 의미하고(그림 3(a)) 코일의 온도차가 크면 클수록 가스의 흐름이 많다는 의미이다(그림 3(b)). 이런 온도차를 휘트스톤브리지 회로에서 전기적인 신호로 변환시킨 후 가스의 실제 유량을 측정한다.

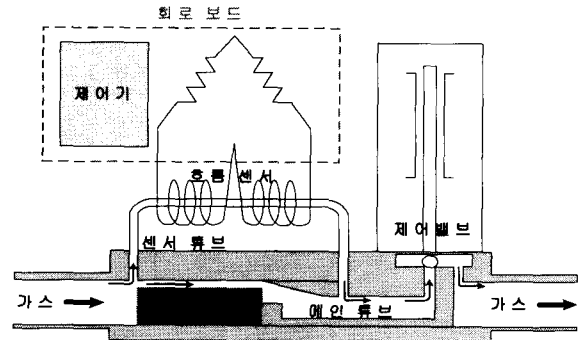
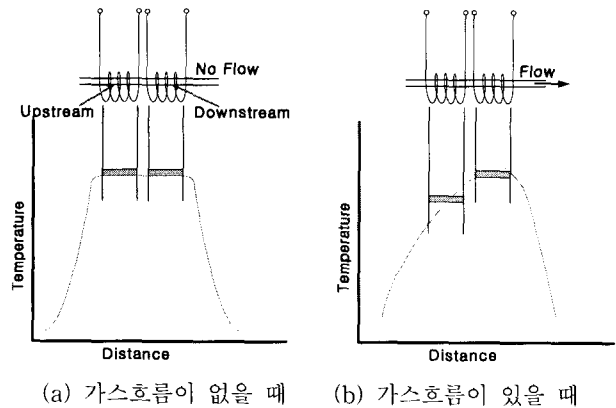


그림 2. MFC의 구조.
Fig. 2. Structure of MFC.



(a) 가스흐름이 없을 때 (b) 가스흐름이 있을 때

그림 3. 흐름센서의 동작원리.
Fig. 3. Operation principle of flow sensor.

회로보드에서는 전기적 신호로 변환된 흐름의 크기를 A/D변환기를 통하여 입력받고 마이크로프로세서를 이용하여 제어 알고리즘에 의한 밸브의 개폐정도를 결정한다. 계산된 개폐정도는 D/A변환기를 통하여 제어밸브에 전기적 신호가 가해지게 된다. 이 때에 필요한 여러 가지 파라메타나 목표값은 MFC와 사용자 인터페이스 프로그램간의 연결을 통하여 미리 전달된다. 또한 MFC의 제어상황 및 현재의 흐름 양과 같은 정보는 MFC로부터 사용자 인터페이스 프로그램에 전달되어 표시된다.

2.2 MFC 제어의 문제점 및 특성실험

MFC의 고정밀 제어를 위해서는 몇 가지 고려할 문제점이 있다. 첫째, 시스템 자체에 비선형성이 존재하므로 정확하게 제어하기 어렵다. 특히, 가스와 같은 기체는 활동성이 강하기 때문에 실제 밸브의 간극에 따라 흐름이 그 간극만큼의 흐름을 가진다고는 말할 수 없다. 둘째, 온도 차이에 의한 흐름을 센싱하는 방법에는 필연적으로 센서가 느린 응답 특성을 가진다. 만일, 반도체 제조공정에서 요구되는 MFC의 응답특성

이 센서의 응답특성보다 더 빨라야 한다면 센서의 성능을 개선하기위한 고려가 필요하다. 셋째, 열 변화에 의한 흐름센서는 주위온도에 많은 영향을 받는다. 코일의 열 변화에 의한 전기적 신호는 전원을 인가한 후 두 코일의 가열상태, 가열 시간 그리고 실험환경에서의 주위온도에 따라 많은 오차를 포함할 수 있기 때문에 실험환경의 온도를 일정하게 유지하고 전원을 인가하여 일정한 시간이 흐른 후 측정하는 것이 중요하다.

다음은 시스템의 비선형 특성실험을 위해 상용화된 특정 MFC를, 제어기능을 정지시키고 플랜트의 특성만을 알아본다.

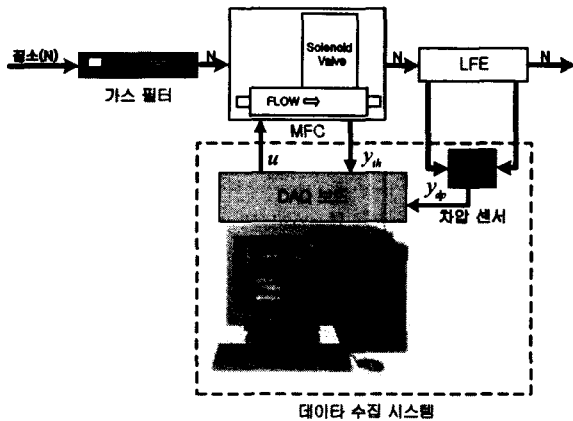


그림 4. 밸브의 특성실험.

Fig. 4. Characteristic experiment of valve.

본 논문에서 u 는 제어 입력 즉, 솔레노이드 밸브에 인가되는 밸브 전압이고 y 는 출력 즉, 실제 솔레노이드 밸브를 통한 가스의 흐름 값이다. 그리고 y_{th} 는 현재의 유량을 두 코일의 온도차에 의해 센싱하는 흐름센서 출력이다. 이 y_{th} 는 y 에 비해 느린 응답특성을 보이게 되는데 적절한 보상기를 통하여 실제의 y 를 추정한 값이 y_c 이다. 또한 y_{dp} 는 차압센서의 출력이다. 여기서 차압센서의 입력은 MFC 유량에 비례하는 차압을 발생시키는 라미널 플로우 엘리먼트(Laminar flow element: LFE) 기구의 출력이다. 본 논문에서, 비교적 응답특성이 빠른 LFE와 차압센서를 이용하여 유량을 측정하는 이유는 기존 MFC의 센싱 특성을 검증하기 위한 것이다. 본 실험에서의 데이터 수집은 PC에 장착된 DAQ(Data Acquisition) 보드를 이용한 데이터 수집 시스템을 이용하였다.

그림 5는 밸브 인가전압에 따른 유량의 변화를 전압으로 측정된 것이다. 그림 5의 y_{th} 을 보면 밸브의 인가전압이 0~5V 사이에서는 전압 변화가 거의 없고 이후 약 6.24V까지는 급속하게 변화하는 것을 알 수 있다. 그림에서 하나의 특성에 그래프가 두개씩 나타난 이유는 u 가 증가할 때와 감소할 때를 동시에 표시한 것이기 때문이다. 즉, 약간 히스테리시스 특성을 보이고 있다. 또한, y_{th} 와 y_{dp} 가 각각 6V와 10V로 포화되는 것은 실험에 사용된 센서의 고유훈성 때문이다.

따라서 밸브전압 0~5V에서는 솔레노이드 밸브의 개폐 움직임이 거의 없어 가스의 흐름 변화가 아주 적고 5V~6.24V에서는 밸브에 인가되는 전압이 약간만 변화하여도 밸브의 개폐 정도가 급격하게 커져 가스의 흐름 차가 크며 그

변화 양상 또한 비선형적이다. 이 실험결과에서 알 수 있듯이 이 MFC는 비선형성이 존재하므로 선형제어 알고리즘에 해당하는 PID 제어 알고리즘으로는 제어가 어려움 예상할 수 있다.

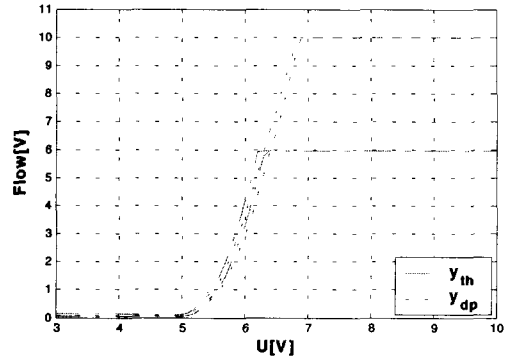


그림 5. 밸브의 설정치에 대한 유량변화.

Fig. 5. The flow variation for setpoint of valve.

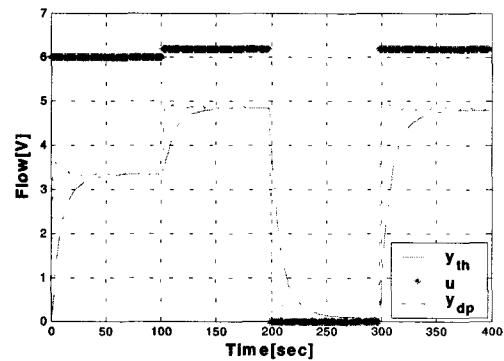


그림 6. 밸브의 설정치 변화에 대한 유량변화의 특성.

Fig. 6. The characteristics of the flow variation for setpoint change of valve.

그림 6은 밸브전압의 시간적 변화에 따른 유량변화의 동특성을 나타낸 것이다. u 가 계단입력으로 변화할 때 y_{th} 와 y_{dp} 을 비교하면 y_{th} 의 상승시간이 느림을 알 수 있다. 이는 y_{th} 가 실제의 흐름을 빠르게 센싱하지 못한다는 의미이다. 따라서 MFC는 비선형, 느린 응답특성이 존재하므로 일반적인 선형제어기로 우수한 결과를 얻기에는 한계가 있다. 그러므로 이와 같은 문제점을 개선할 수 있는 비선형 제어 알고리즘과 보상기가 요구된다.

3. 제안된 퍼지제어기 및 보상기

어떤 미지의 비선형 동특성을 갖는 시스템이 주어질 경우, 이를 제어하는 것은 쉽지 않다. 이를 해결하고자 하는 시도로서 1965년 Zadeh[13]에 의해 퍼지 이론이 제안되었고 Mamdani[14]에 의해 최초로 증기기관의 실제 시스템에 적용하였다. 이후, 분산적, 논리적, 언어적 장점을 이용하여 시멘트 킬른 공정의 제어, 정수장 제어, 이동 로봇 제어 등에 적용되어 산업적 유용성이 입증되었다[15]. 본 논문에서는,

앞서 살펴본 기존 MFC 시스템의 성능개선을 위한 선형 PID 제어방법의 한계를 개선시키기 위하여 비선형 시스템의 제어 방식 중 하나인 퍼지제어 알고리즘을 제안한다. 그리고 흐름 센서의 느린 응답특성을 개선하기 위하여 간단한 구조를 가진 센서의 보상기를 제안한다.

3.1 제안된 퍼지제어기

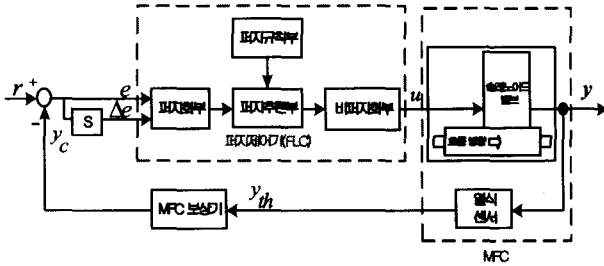


그림 7. 전체 퍼지제어 시스템의 구성도.

Fig. 7. Block diagram of overall fuzzy control system.

그림 7은 제안된 MFC 제어시스템의 전체 구성도이다. 그림에서 r 은 목표값을 나타내고 e 는 오차값 나타내며 Δe 는 오차변화를 나타낸다. 여기에서 목표값 r 과 시스템 오차 e , 오차변화 Δe 와의 관계는 각각 식 (1), 식 (2)와 같다.

$$e(k) = r(k) - y(k) \tag{1}$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \tag{2}$$

퍼지제어 알고리즘의 입출력 관계식을 표현하면 식 (3)과 같다.

$$(e, \Delta e) \rightarrow \Delta u \tag{3}$$

다음은 퍼지제어 알고리즘의 입력변수에 사용된 소속도 함수를 나타낸 것으로서 각 소속도 함수는 시행오차 방법에 의해 구해진다.

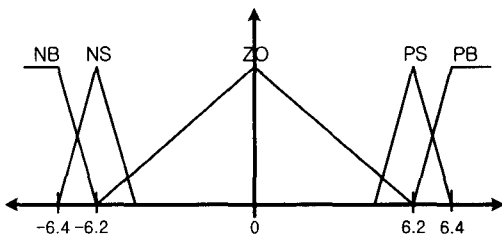


그림 8. 오차에 대한 소속도 함수.

Fig. 8. Membership function of error.

그림 8은 퍼지화부에 사용된 오차에 대한 소속도 함수이다. 이 소속도 함수는 MFC의 비선형 특성에 대한 영향으로 바깥쪽으로 몰려 있는 형태이다. 그림 9는 오차변화에 대한 소속도 함수를 나타낸다. 이 또한 오차에 대한 소속도 함수와 같이 바깥쪽으로 몰려 있음을 볼 수 있다.

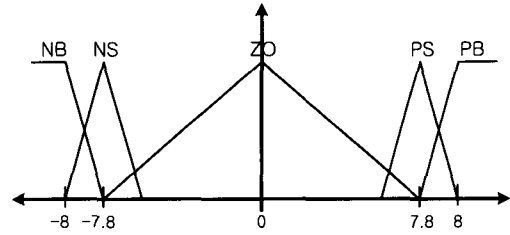


그림 9. 오차 변화에 대한 소속도 함수.

Fig. 9. Membership function of error change.

또한, 그림 10은 출력변수에 대한 소속도 함수를 나타내는데 목표 값에 가까이 갈수록 정밀한 제어를 하기위해 각 소속도 함수가 원점 근처에 몰려있다.

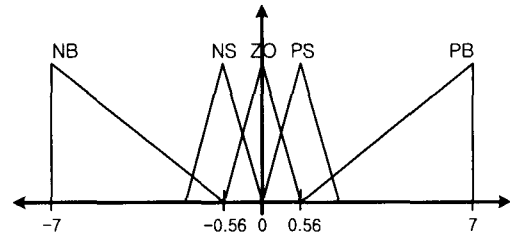


그림 10. 출력변수에 대한 소속도 함수.

Fig. 10. Membership function of output variable.

그림 11은 퍼지 규칙 기반부에 사용된 퍼지 규칙을 나타낸다. 여기에 사용된 퍼지 규칙은 일반적으로 많이 사용되는, 대각선에 대하여 대칭인 퍼지 규칙표의 형태이다. 여기에서는 5×5의 변수를 사용하였지만 필요에 따라 더 많은 변수를 사용하기도 한다. 그러나 변수의 양에 따라서 계산량이 증가하므로 시스템의 특성을 잘 살펴면서 선택하여야 한다. 이외의 퍼지제어 알고리즘 파라미터로서 퍼지 추론부는 Mamdani의 Max-Min방법 을 사용하고 비퍼지화부는 무게 중심법을 사용한다.

e'	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	NB	NB	NS	NS	ZO
NS	NB	NS	NS	ZO	PS
ZO	NS	NS	ZO	PS	PS
PS	NS	ZO	PS	PS	PB
PB	ZO	PS	PS	PB	PB

그림 11. 퍼지 규칙.

Fig. 11. Fuzzy rule.

3.2 흐름센서를 위한 보상기

실험에 사용되는 흐름센서는 두 코일의 열 변화에 의해 가스의 흐름을 측정하는 열식센서를 사용한다. 그림 12는 벨

브전압 u 로서 6.2V의 계단입력을 인가하였을 경우이며 y_{th} 를 y_{dp} 와 비교해 보면 y_{th} 가 지수 함수적으로 증가하는 느린 응답특성을 가지고 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 실제의 흐름 y_{dp} 를 추정하는 보상기가 필요하다. 이 실험에서는 간단한 구조를 가지면서 실제의 유량을 잘 추정하는 1차 시스템 보상기를 제안한다.

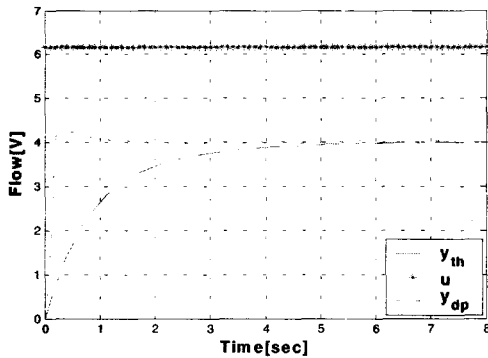


그림 12. 밸브의 스텝 입력에 대한 유량변화.
Fig. 12. The flow variation for step input of valve.

제안된 보상기는 $K(S+a)$ 형태의 시스템으로 기술한다. 이때 최적의 정상상태 오차를 보이는 파라메타 K 와 a 는 시행오차 방법에 의해 $K=2.67$, $a=0.39$ 로 설정한다.

4. MFC 제어 실험결과

이 장에서는 지금까지 소개한 제어방법을 토대로 퍼지 알고리즘을 구현하고 그 실험결과를 보인다. 또한 제안된 퍼지 제어 알고리즘을 기존의 MFC 실험결과, PID 제어 실험결과와 비교하여 그 우수성을 보인다. 본 실험에서 목표값은 센서 값 기준으로 4V이고 샘플링타임은 0.1초로 일정하며 상승시간은 10~90%에 이르는 시간이다.

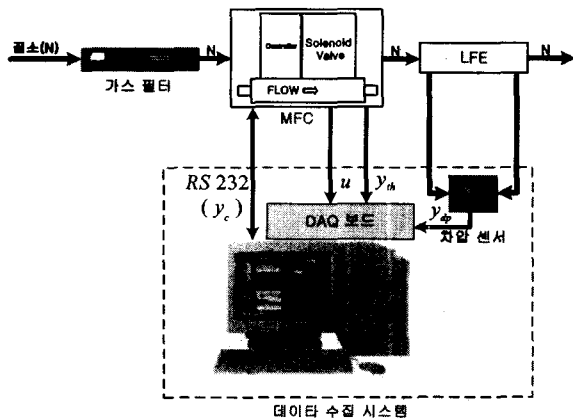


그림 13. 기존 MFC의 실험 환경.
Fig. 13. Experimental environment of current MFC.

4.1 기존의 MFC 실험

현재 상용으로 구입 가능한 하나의 MFC 시스템에 대하여 그 성능을 실험하였다. 이는 그림 13에서 DAQ 보드와 PC는

제어에 관여하지 않고 MFC에 탑재된 마이크로 컨트롤러 기반의 PID 제어 알고리즘으로 구현된 것이다. 이 실험에 대한 성능분석은 표 1과 같다. 그림 14에서 보는 바와 같이 시간 지연은 y_{dp} 가 1.2[sec]이고 y_c 가 1.3[sec]으로 실제 흐름과 유사하다. 하지만 상승시간을 보면 y_{dp} 가 0.4[sec]이고 y_c 가 2.3[sec]로서 원하는 기준 입력을 빠르게 추정하지 못하고 있다.

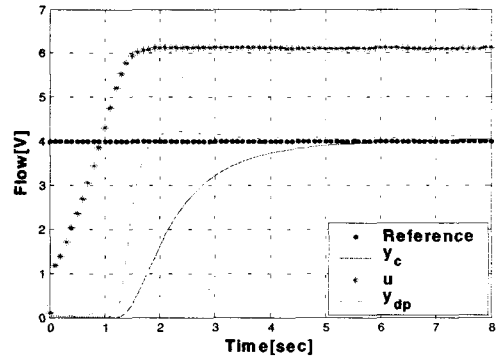


그림 14. 기존 MFC의 실험결과.
Fig. 14. Experimental result of current MFC.

표 1. 기존 MFC 실험의 성능분석.
Table 1. Performance analysis of current MFC experiment.

종류	성능	시간지연[초]	상승시간[초] (0.4 ~ 3.6)
y_{dp}		1.2	0.4
y_c		1.3	2.3

4.2 PID 제어 알고리즘 실험

그림 15는 그림 13에서 MFC의 마이크로 컨트롤러의 기능을 제거하고, DAQ 보드와 PC에 PID 제어 알고리즘 및 흐름센서 보상기를 구현하여 실험한 결과이다. 실험에 대한 성능분석은 표 2와 같다. 제어 알고리즘에 사용된 PID 계수는 각각 $K_p=0.3$, $K_I=0.1$, $K_D=0.3$ 이고 이 때의 보상기는 1차 시스템인 $K(S+a)$ 로서 $K=2.3$, $a=0.4$ 일 때 최적을 결과값을 가짐을 반복실험을 통하여 알 수 있었다. 하지만 선형 시스템의 제어 알고리즘으로 알려져 있는 PID 제어 알고리즘은 그림 15와 표 2에서 보는 바와 같이 기존의 MFC 제어 알고리즘보다 보상기에 의한 센서 응답 상승시간은 크게 개선되지만 느린 응답특성은 여전히 존재함을 알 수 있다.

표 2. PID 제어 실험의 성능분석.
Table 2. Performance analysis of PID control experiment.

종류	성능	시간지연[초]	상승시간[초] (0.4 ~ 3.6)
y_{dp}		1.0	0.7
y_c		1.0	1.0

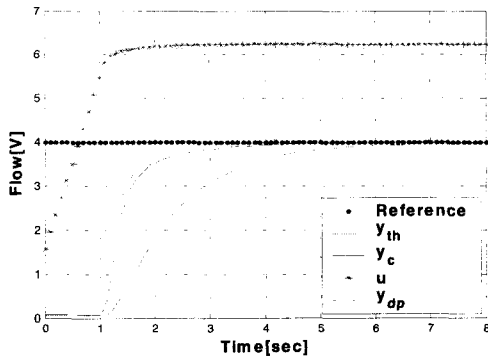


그림 15. PID 제어의 실험결과.
Fig. 15. Experimental result of PID control.

4.3 제안된 퍼지제어 알고리즘 실험

그림 16은 4.2절의 PID 알고리즘을 퍼지제어 알고리즘으로 대체하고 흐름센서 보상기를 적용하였을 때의 실험 결과이다. 그리고 이 실험에 대한 성능분석은 표 3과 같다. 퍼지제어 알고리즘의 퍼지화부에서 입력변수는 그림 8, 그림 9에서 보는 것과 같이 오차, 오차변화에 대한 소속도 함수를 결정하여 사용하였고 출력변수는 그림 10에서와 같이 원점 근처에 물려있는 형태의 소속도 함수를 사용하였다. 또한 퍼지 규칙부에서는 대각선에 대하여 대칭인 5×5의 변수를 사용하였고 퍼지 추론부에서는 Mamdani의 Max-Min방법 그리고 비퍼지화부는 무게 중심법을 사용하였다. 또한 흐름센서의 상승시간을 보상하기 위해 제안된 보상기는 시행오차 방법을 통하여 1차 시스템인 2.67(S+0.39)를 결정하였다.

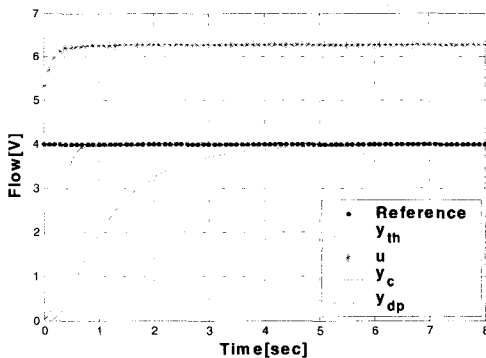


그림 16. 퍼지제어의 실험결과.
Fig. 16. Experimental result of fuzzy control.

표 3. 퍼지제어 실험의 성능분석.
Table 3. Performance analysis of fuzzy control experiment.

종류 \ 성능	시간지연[초]	상승시간[초] (0.4 ~ 3.6)
y_{dp}	0	0.3
y_c	0	0.3

그림 16과 표 3에서 보는 바와 같이 퍼지제어 알고리즘을 적용한 경우가 기존의 MFC 제어 알고리즘과 PID 제어 알고리즘에 대하여 우수함을 볼 수 있다. 상승시간의 경우 y_{dp} 는 0.3[sec]이고 y_c 가 0.3[sec]으로 성능이 아주 개선되었다.

5. 결론

본 논문에서는 산업체에서 사용되고 있는 MFC의 전통적인 PID 제어 알고리즘보다 우수한 제어 알고리즘을 제안하였고 그 우수성은 실험을 통하여 증명하였다. 또한 느린 응답시간을 갖는 흐름센서의 특성을 개선 방법으로 보상기를 사용하였다. 그리고 DAQ보드를 이용한 PC기반의 LabWindows/CVI를 이용하여 실시간으로 플랜트의 상태를 모니터링 하여 문제점을 수정하였다. PC 기반으로 구현된 제어 알고리즘은 향후 마이크로 컨트롤러 프로그램으로 이식되어 실제 상용화될 수 있다.

제안된 MFC 제어 알고리즘은 비선형 제어 알고리즘 중에서 수학적 모델링이 필요 없고 전문가의 경험과 직관에 의한 규칙을 언어 변수로 표현하여 구현할 수 있는 퍼지제어 알고리즘을 사용하였다. 제안된 퍼지제어 알고리즘을 사용할 경우 비선형성과 시간지연이 존재하는 MFC를 기존의 제어 알고리즘 결과보다 더 우수함을 볼 수 있었다. 그리고 흐름센서에 의한 느린 응답시간을 간단한 구조를 가진 2.67(S+0.39) 형태의 1차보상기에 의해 상승시간이 개선됨을 알 수 있었다.

후후 연구과제로는 지금까지 실험한 제어 알고리즘의 변수들은 반복실험에 의해 얻은 값이므로 셀프 튜닝을 위한 비선형 제어 알고리즘의 접목과 느린 응답특성을 개선할 수 있는 더욱 정밀한 보상기의 연구가 필요하다.

참고 문헌

- [1] http://www.advanced-energy.com/Upload/AE_mass_advances.pdf.
- [2] J. C. Lotters, "Thermal Liquid Mass Flow Controller with Fast Response and Easy Rangeability," Proceedings of sensor, Vol. 1, pp. 257-262, 2001.
- [3] www.omega.co.uk/literature/transactions/volume_4.
- [4] L. D. Hinkle and C. F. Mariano, "Toward Understanding The Fundamental Mechanisms and Properties of the Thermal Mass Flow Controller," Journal of Vacuum Science and Technology A, Vol. 9, No. 3, pp. 2043-2047, 1991.
- [5] T. S. J. Lammerink, N. R. Tas, M. Elwenspoek, and J. H. J. Fluitman, "Micro-Liquid Flow Sensor," Sensors and Actuators A, Vol. 37-38, pp. 45-50, 1993.
- [6] M. Elwenspoek, T. S. T. Lammerink, R. Miyake, and J. H. J. Fluitman, "Toward Integrated Microliquid Handling Systems," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 4, pp. 227-245, 1994.

- [7] M. Esashi, "Integrated Micro Flow Control Systems," Sensors and Actuators A, Vol. 21, No. 1-3, pp. 161-167, 1990.
- [8] K. Komiya, F. Higuchi, and K. Ohtani, "Characteristics of a Thermal Gas Flowmeter," Review of Scientific Instruments, Vol.59, pp. 477-479, 1988.
- [9] S. A. Tison, "A Critical Evaluation of Thermal Mass Flow Rate," Journal of Vacuum Science and Technology A, Vol. 14, pp. 2582-2591, 1996.
- [10] S. A. Tison, "Accurate Flow Measurement in Vacuum Processing," Solid State Technology, pp. 73-83, 1996.
- [11] P. Rudent and P. Navratil, "Design of a New Sensor for Mass Flow Controller Using Thin-Film Technology based on an Analytic Thermal Model," Journal of Vacuum Science and Technology A, Vol. 16, pp. 3559-3563, 1998.
- [12] L. A. Zadeh, "Fuzzy Sets," Information and Control, Vol. 8, pp. 338-353, 1965.
- [13] E. H. Mamdani, "Application of Fuzzy Algorithm for Control of Simple Dynamic Plant," Proceedings of IEE, Vol. 121, no. 12, pp. 1585-1588, 1974.
- [14] 채석, 오영석, *퍼지이론과 제어*, 청문각, 1995.



이연정(Yun-Jung Lee)

1984년 한양대학교 전자공학과 졸업. 1986년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사, 동대학원 박사(1994). 현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 부교수.

관심분야 : 로봇틱스, 산업 자동화 및 지능 제어.

Phone : 053-950-6562

Fax : 053-950-5505

E-mail : yjlee@ee.knu.ac.kr



이승하(Seung-Ha Lee)

1988년 경북대학교 전자공학과 졸업. 1990년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사, 동대학원 박사(1995). 현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 부교수(BK).

관심분야 : 자동화시스템, 지능제어, 로봇틱스.

Phone : 053-950-6601

Fax : 053-950-5505

E-mail : shalee@ee.knu.ac.kr

저 자 소 개

이석기(Seok-Ki Lee)

2001년 부산외국어대학교 전자공학과 졸업. 2004년 경북대학교 전자공학과 석사 졸업. 현재 한국원자력연구소 양성자기반공학 기술개발사업단 연구원.

관심분야 : 지능제어, 자동화시스템.

Phone : 042-868-8740

Fax : 042-868-8131

E-mail : ex-sklee@kaeri.re.kr