

화학공정의 비례-적분-미분(PID) 제어기의 자동조정(Autotuning) 방법

성수환, 한종훈

포항공과대학교 화학공학과, 지능자동화 연구센터

1. 서 론

화학공정은 물질의 수송이나 에너지의 전달을 수반하기 때문에 시간지연이 존재하고 내부역학이나 반응이 복잡하며 측정이 되지 않는 외란이 많아 해당되는 화학공정에 대해 정확한 모델을 구한다는 것은 사실상 불가능하다. 그래서 대체로 공정의 특성을 확인하는 한 방법으로 적당한 형태의 확인용 제어출력을 이용하여 공정을 활성화시켜 임계데이터(Ultimate data)를 구해내거나 시간지연모델(Time delay model)을 사용하여 공정을 모델링할 수 밖에 없고 구조가 간단하고 현장 조업자들에게 친숙하며 제어기 자체가 안정적인 비례-적분-미분(PID)제어기가 복잡한 화학공정의 제어를 위해 가장 널리 사용되는 것이다.

이 제어기는 세 가지의 조절변수(Tuning parameters) 즉 비례이득, 적분시간, 미분시간을 가지고 있다. 비례-적분-미분 제어기의 이득과 시간은 좋은 제어효과를 위해 공정의 이득과 공정의 시상수에 따라 적당하게 지정되어야 한다. 초기에는 대체로 비례제어기를 이용한 시행착오 방법이나 공정응답곡선방법(Process reaction curve method)을 이용하여 공정의 임계이득과 임계주기를, 혹은 일차시간지연(First order plus time delay) 형태로 공정의 모델을 구한 다음 이것을 근거로 비례-적분-미분 제어기의 조절변수를 구하였다. 그러나 비례제어기를 사용하여 임계이득과 임계주기를 구해내는 작업은 상당히 번거롭고 시간이 많이 걸리며 공정을 안정과 불안정의 경계까지 몰고 가기 때문에 위험성을 수반한다. 그리고 공정응답곡선방법으로 일차시간지연모델을 구해내는 것은 공정을 개루프(Open-loop)상태로 정상상태에 도달할 때 까지 방치해야 하기 때문에 공정의 모델링 시간이 많이 걸리고 외란에 민감하며 또한 변곡점의

결정에 있어 조업자의 주관이 많은 영향을 준다. 나아가 제어기가 동작하는 주파수영역과는 거리가 먼 주파수 영역을 모델링 하기 때문에 최적의 제어기 조절과는 상당한 차이가 생길수 있다. 그래서 온라인상태에서 제어기가 동작하는 영역을 보다 짧은 시간내에 모델링하고 구해진 모델을 근거로 제어기의 이득과 시간을 자동적으로 지정할 수 있는 비례-적분-미분 제어기의 자동 조정(Auto-tuning) 방법이 필요한 것이다.

제어기의 조절변수는 공정의 특징(예로 공정의 이득과 시상수)에 의존하기 때문에 비례-적분-미분 제어기의 자동조절을 위해서는 당연히 공정의 이득과 시상수 등을 얻는 모델링 작업이 선행되어 져야 한다. 즉 한마디로 제어기의 자동조정이라 하는 것은 공정의 모델링 작업을 자동적으로 수행하고 구해진 모델에 맞는 제어기 조절변수를 어떤 정해진 조절방법(Tuning method)에 의해 결정하는 작업이라 할 수 있다. 일련의 자동조절을 위한 이 작업은 온라인으로 이루어 져야 하기 때문에 모델링을 위한 식과 제어기의 조절을 위한 식은 간단해야 하며 수치해석적인 기술을 가능한 배제 해야 한다. 공정의 모델을 구하기 위해서는 공정을 활성화시킬수 있는 확인용 신호가 필요하다. 이 확인용신호는 공정출력을 어떤 지정된 범위내에 유지시킴과 동시에 공정을 충분히 활성화시킬수 있어야 하며 가능한 확인용신호를 발생시키기 위해서 해당되는 공정에 관한 정보가 요구되지 않아야 한다. 자동조절을 위한 개략적 절차가 그림 1에 나타나 있다. 제일 먼저 현재 비례-적분-미분 제어기의 제어 성능이 만족스럽지 못할 경우 사용자가 자동조정모듈을 선택한다. 그러면 자동제어(비례-적분-미분 제어) 모듈에서 자동조정모듈로 변환이 되고 자동조정 모듈에서는 확인용 신호(Test signal)를 발생시켜 공정을 활성화시킨다. 활성화

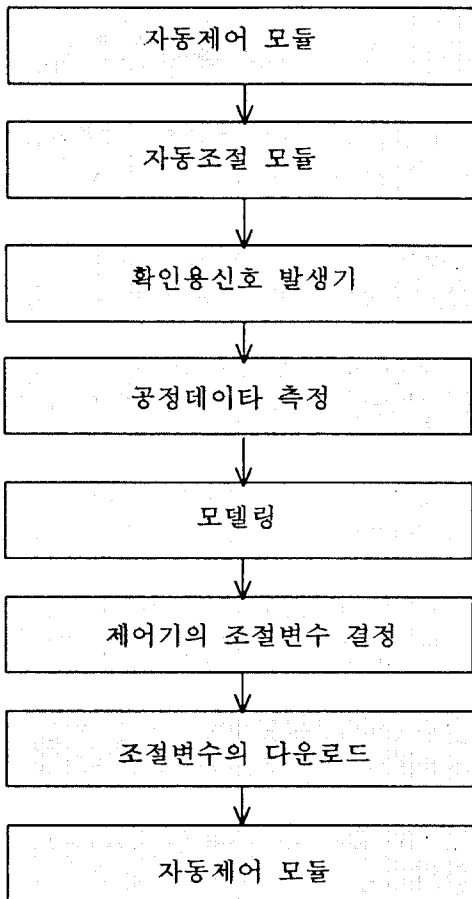


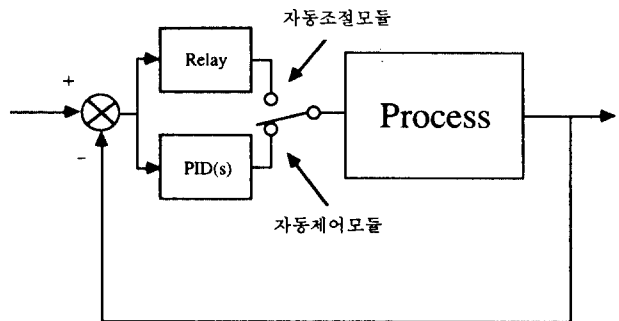
그림 1. 자동조절을 위한 절차.

화된 공정으로 부터 정보를 얻고 각 자동조절 방법 특유의 모델링 식을 이용하여 얻어진 공정의 정보를 근거로 공정의 모델을 구하게 된다. 대체로 이 모델은 적분시간지연(Integrator plus time delay), 일차시간지연(First order plus time delay), 이차시간지연(Second order plus time delay) 형태를 가지거나 혹은 주기나 Amplitude Ratio(AR)형태의 데이터일 수도 있다. 다음으로 정해진 제어기 조절방법을 이용하여 구해진 공정의 모델로부터 비례-적분-미분 제어기의 조절변수를 구한다. 마지막으로 구해진 제어기의 조절변수를 제어기에 다운로드시키고 다시 자동조절모듈에서 자동제어모듈로 되돌리면 자동조절기능은 끝나게 된다. 대체로 공정의 모델링 작업을 위한 확인용 신호 발생기의 종류에 따라 비례-적분-미분 제어기의 자동조절 방법은 현재 까지 릴레이를 이용한 방법, 비례제어기를 이용한 방법, 릴레이와 비례제어기를 접목한 방법, 확인용 신호발생기의 형태에 구애받지않는 방법의 네 가지로 집약된다. 여기서 현재 상업용으로 판매되고 있는 것은 릴레이를 이용한 방법이고 나머지는 현실성 있는 이론이 만들어 진 것이 최근이라 상업용으로 만들려는 시도를 몇몇 연구자가 하고 있을 뿐 아직 완성되어 판매되고 있는 것은 아니다.

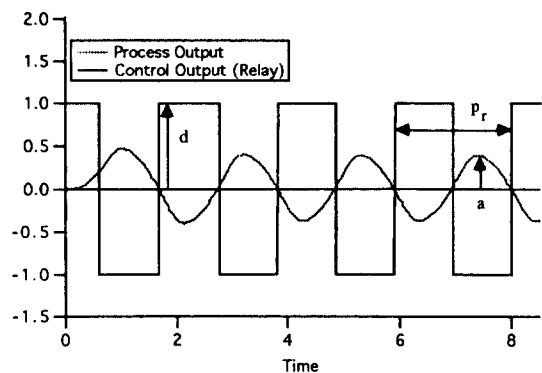
2. 주요 자동조절 방법들

2.1 릴레이를 이용한 자동조절 방법

1984년도에 Astrom과 Hagglund는 릴레이를 이용하여 공정의 임계주기(Ultimate period)와 임계이득(Ultimate gain)을 구해내는 방법을 제시하였다[1]. 이 방법은 릴레이의 출력 즉 구형파(Square wave)를 Fourier series를 이용하여 Sine신호로 효과적으로 근사를 할 수 있다는데 이론적 근간을 두고 있다. 이 방법은 간단하여 현장에서 많이 사용되어 지고 있고 상업용으로 판매되고 있다. 그림 2에 이 방법을 나타내었다. 현재 제어기의 성능이 만족스럽지 못하면 버튼을 눌러 제어 모듈에서 자동조절 모듈로 전환시킨다. 그러면 그림 2(b)와 같은 릴레이 출력이 공정을 활성화시켜 공정의 정보를 구할 수 있게 한다. 즉 일정 크기의 제어출력 d 를 공정의 출력이 처음상태에서 벗어날 때까지 넣어준다. 일단 공정이 어느 정도 처음상태에서 벗어나면 반대방향의 제어출력 $-d$ 를 넣어준다. 이 다음 부터는 반복작업을 계속 한다. 즉 공정출력이 0을 지날 때 제어출력 d 를 다시 넣어 주고 다시 공정출력에 0을 지날 때 제어출력 $-d$ 를 넣어 준다. 이 작업을 공정출력이 0을 지날 때마다 보통 3-4번 반복하면 그림 2(b)와 같이 일정한 주기의 제어기 출력과 공정출력이 얻어진다. 여기서 0은 릴레이를 작용시킬 때 즉 처음의 공정출력 값을 의미한다. 여기서 제어기의 출력 즉



(a)



(b)

그림 2. 릴레이를 이용한 자동조절.

구형파(Square wave)를 Fourier series를 이용하여 Sine 신호로 근사 할 수 있다. 여기서 고차의 조화(Harmonic)항들을 무시하여 기본파만 고려하고 공정출력을 주기 p ,과 크기 a 를 가진 Sine신호라 가정하면 쉽게 아래와 같이 공정의 정보를 구해낼 수 있다.

$$P_u = P_r \quad (1)$$

$$K_{cu} = \frac{4d}{\pi a} \quad (2)$$

여기서 P_u 는 공정의 임계주기(Ultimate period)이고 K_{cu} 는 공정의 임계이득(Ultimate gain)을 말한다. 이렇게 공정에 릴레이 형태의 제어출력을 넣어 측정된 데이터 p ,과 a 로부터 임계정보를 구했다면 Ziegler-Nichols조절 방법을 사용하여 비례-적분-미분 제어기의 조절변수를 구한다[2]. 그리고 구해진 제어기의 조절변수를 제어기에 다운로드시킨 다음 다시 제어모듈로 전환하면 자동조절은 끝이 난다. 이 방법은 공정이 안정하다면 항상 페루프의 안정성이 보장된다는 장점이 있다.

이 방법은 이후로 많은 부분에서 개선이 되었고 또한 많은 분야에 응용되었다. 1993년 Hang등은 릴레이 되먹임(Relay feedback)을 하는 동안에 일정함 값의 외란이 공정에 들어올 경우 기존의 방법보다 효과적인 대응책을 제시하였다[3]. 또한 1992년에 Schei는 폐루프(Closed-loop)에 필터(Low-pass filter)를 접목한 릴레이를 걸어 페루프의 전달함수가 지정된 Amplitude ratio(AR)와 주파수를 가지도록 제어기의 조절변수를 조절함으로써 보다 노이즈와 외란에 강건한 자동조절방법을 제시하였다[4]. Dumont등은 자동조절된 비례-적분-미분 제어기와 적응-예측제어(Adaptive-predictive control)를 비교하여 시간지연이 작을 경우 비례-적분-미분제어기가 외란제어에서 더 우수하고 시간지연이 큰 공정에서 설정치 변화에 대해서는 적응-예측제어가 유리하기 때문에 공정의 특성에 따라 상호 보완적인 제어전략이 필요하다고 결론을 지었다[5]. Astrom등은 1993년에 릴레이 되먹임(Relay feedback)을 이산공정모델(Discrete process model)을 구하는데 사용하였고 그들이 제시한 방법을 Heating, ventilation and air-conditioning(HVAC)공정에 적용하였다[6]. 1993년에 Lee는 pH공정을 모델링하기 위해 릴레이 형태의 확인용 신호를 이용하여 pH공정을 활성화시켜 pH공정을 묘사하기 위해 가정된 세 가지의 파라미터를 구하였고 Lin과 Yu는 pH공정에서 적정 곡선과 조절상수들을 구하기 위해 릴레이를 사용하였다[7], [8]. 1993년 Lee와 Sung은 공정모델로서 일차시간지연모델을 구하기 위해 릴레이 형태의 확인용신호를 이용하였고 [9] 1987년에 Luyben의 Autotune Variation(ATV)법 역시 이 방법을 사용하여 공정의 전달함수를 구해냈고[10] 이 ATV방법은 다시 1991년에 Li등[11]에 의해 1992년에

는 Chang등[12]에 의해 개선되었다. 그리고 이 방법은 다시 Multi-Input, Multi-Output (MIMO) 시스템으로 확장되었다. 1994년에 Loh와 Vasnani[13]는 MIMO 시스템에 릴레이를 동시에 공정출력(혹은 공정입력)의 갯수 만큼 사용하여 제어를 자동조절하는 방법과 이 작업을 가능하게 하는 필요충분조건을 제시하였다. Sequential loop closing 개념을 이용하여 MIMO시스템에서 분산 (Decentralized) 비례-적분-미분 제어기의 자동조절에 사용된 사례가 있는데 [14,15] 대략적인 개념은 다음과 같다. 예로 그림 3과 같은 2×2 MIMO시스템을 고려하자. 처음에 $PID_1(s)$ 를 달지 않은 상태에서 u_1 과 y_1 에 릴레이를 걸어 제어기 $PID_1(s)$ 을 자동조절한다. 다음으로 $PID_1(s)$ 을 연결한 상태에서 u_2 와 y_2 에 릴레이를 걸어 $PID_2(s)$ 를 자동조절한다. 다시 $PID_2(s)$ 를 연결한 상태에서 u_1 과 y_1 에 릴레이를 걸어 제어기 $PID_1(s)$ 을 자동조절한다. 이 같은 작업을 1번 내지 2번 정도 반복하면 제어기의 조절변수들은 수렴한다. 이 방법으로 MIMO시스템에서 제어기의 조절변수를 자동조절할 경우 Luyben(1986)[16]의 Biggest log modulus tuning(BLT) 조절이나 이것을 개선한 Monica등[17]의 방법같은 기존의 MIMO시스템의 조절방법들에 비해 요구되는 공정의 정보가 작고 작업 또한 용이하다.

릴레이 실험을 통해 일차이상의 시간지연모델을 구해낼때는 대체로 여러번의 실험이 필요하였다. 그러나 1994년에 Friman과 Waller[18]는 한 번의 릴레이실험을 이용하여 적분시간지연모델(Integrator plus time delay model)을 확인하였다. 물론 화학공정에 액위제어나 압력제어 같은 적분 공정(Integrating process)이 있기도 하지만 많은 부분의 화학공정에서 공정시상수의 크기가 시간지연보다 상당히 클 경우가 있는데 이때 제어기가 동작하는 고주파수의 영역을 적분시간지연모델이 잘 표현해 주기 때문에 그들은 이 모델이 의미 있다고 주장한다. 즉, 공정이 저차이면서 시상수가

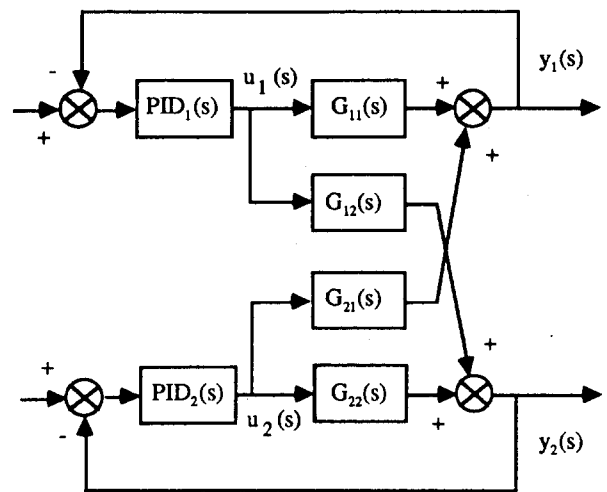


그림 3. 2×2 Multi-input, Multi-output 시스템.

크고 시간지연이 상당히 작을 경우 얻을 수 있는 제어 성능은 매우 높다. 제어기는 당연히 얻을 수 있는 좋은 제어 성능을 보장하기 위해 과감한 제어 출력 즉 고주파수의 제어 출력을 공정 입력으로 발생시키기 때문에 조업 영역은 대체로 Nyquist plot에서 3사분면으로 국한된다. 그러므로 3사분면을 묘사할 수 있는 적분시간지연 모델을 사용하여 시상수가 큰 공정을 잘 근사할 수 있다. 실제 시상수가 큰 공정과 근사된 적분시간지연 모델의 Bode 그림이나 계단 입력 반응을 비교해 보면 상당한 의미를 찾을 수 있다. 이 논문이 다루는 분야와는 다르지만 보다 간단한 적분 모델로 근사하는 개념의 응용에 대해 예를 하나 더 들자면 Dynamic matrix control(DMC)에서 계산 시간이나 메모리의 절약을 위해 적분 모델을 사용하기도 한다[19]. 이렇게 간단한 모델을 사용함으로써 한 번의 릴레이 실험으로 필요한 모델의 계수를 모두 구해 낼 수 있고 제어기의 조절 방법이 간단하다는 장점이 생긴다. 그러나 좋은 성능을 내는 제어기의 동작 주파수 범위가 제한되어 있는 공정에만 보다 간단한 모델로 근사하여 공정을 확인할 수 있다는 점을 유의해야 한다. 릴레이에서 구해진 임계 정보는 다시 적응제어나 예측제어에서 사용되는 Auto-regressive moving average with exogenous input (ARMAX) 또는 Auto-regressive integrated moving average with exogenous input (ARIMAX) 모델의 시간지연이나 샘플링 시간 등의 결정에 효과적으로 사용될 수 있다[20].

지금까지 릴레이를 응용하여 공정의 임계 정보를 이끌어 내는 방법은 이론적 개발 단계에서 구형파(Square wave)를 Sine파로 근사를 할 때 기본파(Fundamental wave)만을 고려하였다. 때로 이렇게 고차의 조화(Harmonic) 항들을 무시하여 구해진 임계 정보는 정확도를 잃어버릴 수 있다. 그래서 1995년에 Sung 등[21]이 개선된 방법을 제시하였다. 그들은 구형파(Square wave) 즉 한 주기당 2 계단(Step) 파형 대신에 Sine파에 보다 가까운 여러 계단(Step)의 파를 이용하였다. 이렇게 하여 릴레이 실험의 간결성을 유지하면서 간단히 고차 조화(Harmonic) 항을 무시할 수 있을 정도로 작게 만들어 정확도를 더욱 높였다.

이렇게 릴레이를 이용한 공정의 임계 데이터를 구해내는 방법은 임계주파수(Critical frequency)를 가지는 대부분의 안정한 공정에 적용될 수 있고 사용자가 지정해주어야 하는 것은 단지 릴레이 제어 출력의 크기밖에 없기 때문에 아주 편리하며 개념 자체가 간단하다는 장점을 가지고 있다. 그러나 이 방법에서는 공정의 임계 정보만 얻을 수 있기 때문에 비례-적분-미분 제어기의 조절 변수를 구할 때 Ziegler-Nichols 조절 방법 밖에 사용할 수가 없다. 그런데 이 조절 방법만 가지고는 아주 좋은 제어 효과를 기대하기 힘들다. 예로 공정이 저감쇠진동(Under-damped)이나 시간지연이 시상수에 비해 지나치게 클 경우 이 조절 방법은 계단형 설정치

변화에 대해 때로 너무 큰 과도 응답(Overshoot)을 보이게 되며 최적의 조절 방법과는 차이가 커질 수 있다.

2.2 비례 제어를 이용한 자동조절 방법

1982년에 Yuwana와 Seborg [22]에 의해 공정의 모델로서 일차시간지연 모델을 구해내기 위해 처음 제시되었다. 이 방법은 확인용 신호를 만드는데 있어 비례제어를 이용하여 공정을 활성화시키고 여기서 측정된 데이터를 근거로 공정의 모델을 구하는 방법이다. 그림 4에 비례제어에 의한 공정의 활성화 모양을 나타내었다. 비례제어를 이용하여 공정의 전달 함수를 구하는 방법은 그후로 많은 개선이 이루어졌다. 이 방법들은 공정의 모델로서 일차시간지연 모델을 사용하였다. 그래서 Ziegler-Nichols 조절 방법[2] 뿐 아니라 Internal model control(IMC) [23], Integral of time weighted absolute error (ITAE) [24], Cohen-Coon [25] 방법들을 사용할 수 있다. Yuwana와 Seborg는 이론적 개발 단계에서 시간지연 항을 처리하기 위해 일차 Pade 근사를 이용한 반면 1984년에 Jutan과 Rodriguez[26]는 이차 Pade 근사를 이용하여 Yuwana와 Seborg의 방법보다 공정 모델의 정확도를 높였고 1989년에는 Chen[27]이 개루프 전달 함수의 임계주파수(Critical frequency)가 폐루프 전달 함수의 임계주파수와 같다는 원리를 이용하여 비례 제어기 자동조절 방법을 개선하였고 역시 1989년에 Lee[28]는 공정의 모델로서 일차시간지연 모델을 구하기 위해 Dominant pole matching 기술을 이용하여 비례 제어기 자동조절 방법을 개선하였다. 1989년에 Jutan[29]은 Yuwana와

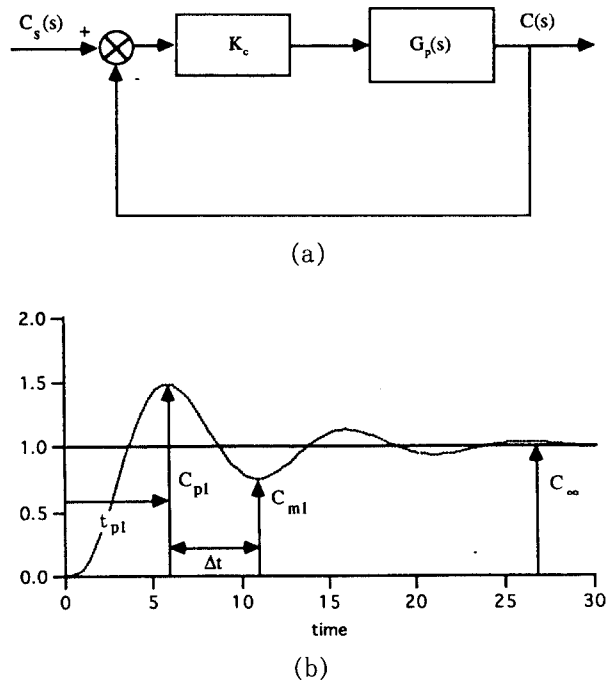


그림 4. 비례제어를 이용한 자동조절.

Seborg(1982)의 방법과 Jutan과 Rodriguez(1984)의 방법, Lee(1989)의 방법을 비교 분석하였는데 대부분의 경우 Lee(1989)의 방법이 우수하다고 평했다.

여기서는 비례제어기를 이용한 자동조절의 대표적 방법으로서 Lee의 방법을 설명하고자 한다. 자동조절 모듈이 선택되어 지면 계단형태의 설정치를 가지는 비례제어기가 활성화된다. 그러면 공정의 출력은 그림 4b과 같은 모양으로 제어된다. 지금까지 말한 비례제어기 방법은 일단 그림 4b의 페루프 공정 출력을 이차시간지연 모델로 근사를 한다. 즉 계단식 설정치 변화에 대한 공정의 출력을 측정 한 첫 번째 피크 C_{p1} , 첫 번째 최소값 C_{m1} , 정상상태에서의 값 C_{∞} , 반주기 Δt 를 이용하여 이차시간지연모델로서 근사한다. Lee 방법은 이 구해진 페루프의 이차시간지연 모델이 나오도록 공정의 일차시간지연 모델을 역으로 구해내는 방법이다. 즉 그림 4(a)와 같이 비례제어기를 이용하여 제어를 하면 그림 4(b)와 같은 공정출력이 나오게 되는데 이 페루프 공정출력은 다음과 같은 이차시간지연으로 근사될 수 있다 [30].

$$\frac{C(s)}{C_s(s)} = \frac{\exp(-\theta s) \left[\frac{K_c K_m}{1 + K_c K_m} \right]}{(\tau^2 s^2 + 2\tau \xi s + 1)} \quad (3)$$

$$\xi = - \frac{\ln \left(\frac{C_{\infty} - C_{m1}}{C_{p1} C} \right)}{\sqrt{\pi^2 + \left[\ln \left(\frac{C_{\infty} - C_{m1}}{C_{p1} - C_{\infty}} \right) \right]^2}} \quad (4)$$

$$\tau = \Delta t \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{\pi} \quad (5)$$

위에서 $C(s)$ 는 그림 4에서 공정출력의 Laplace transform을 나타낸다. 이렇게 하여 비례제어기에 의한 제어결과를 (3)의 이차시간지연으로 근사를 한 후 이것을 근거로 공정의 일차시간지연모델을 구해야 한다. 공정을 다음의 일차시간지연모델로 표현된다고 하자.

$$G_m(s) = \frac{K_m \exp(-\theta_m s)}{\tau_m s + 1} \quad (6)$$

그러면 K_m 은 정상상태의 데이터로부터 쉽게 구할 수 있고 비례제어기를 사용하였을 경우 아래와 같은 페루프 공정출력이 생긴다.

$$K_m = \frac{C_{\infty}}{u_{\infty}} = \frac{C_{\infty}}{K_c(C_s - C_{\infty})} \quad (7)$$

여기서 C_s 와 u_{∞} 는 각각 계단형 설정치의 크기와 정상상태에서 제어출력을 나타낸다.

$$\frac{C(s)}{C_s(s)} = \frac{K_c K_m \exp(-\theta_m s)}{1 + \tau_m s + K_c K_m \exp(-\theta_m s)} / (1 + K_c K_m) \quad (8)$$

$$= \frac{\exp(-\theta_m s) \left[\frac{K_c K_m}{1 + K_c K_m} \right]}{(1 + \tau_m s + K_c K_m \exp(-\theta_m s)) / (1 + K_c K_m)} \quad (9)$$

(9)가 (3)과 같게 되는 τ_m, θ_m 을 구해야 한다. 이것은 실제로는 (9)에 시간지연이 있기 때문에 불가능하지만 차선책으로 (3)의 Pole이 (9) 혹은 (8)의 Pole과 같도록 (6)의 θ_m 과 τ_m 을 결정한다. 즉 (3)의 Pole은 다음과 같다.

$$P_1 = -\frac{\xi}{\tau} + j \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{\tau} \quad (10)$$

$$P_2 = -\frac{\xi}{\tau} - j \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{\tau} \quad (11)$$

이 두 개를 (8)이나 (9)중 어느 하나에 s 대신 넣고 해당되는 식을 0으로 두면 두 개의 등식이 나오고 이식을 연립하면 θ_m 과 τ_m 을 구할 수 있다. 쉽게 연립방정식을 푸는 방법이 논문에 제시되어 있다. 이렇게 일단은 비례제어기에 의한 출력 결과를 이차시간지연모델로 근사를 한 다음 이것을 근거로 공정의 일차시간지연 모델을 구한다. 다음으로 다양한 비례-적분-미분 제어기의 조절방법을 이용하여 제어기의 조절변수를 구하고 이것을 제어기에 다운로드시키고 제어모듈로 전환하면 비례제어기를 이용한 자동조절 방법은 끝난다. 참고로 일차시간지연모델을 사용하는 비례-적분-미분 제어기의 조절방법에서 계단형 설정치 변경에 가장 좋은 방법은 Internal model control (IMC)방법이고 계단형 또는 느린 공정입력 외란(Process input disturbance)에 가장 좋은 조절방법은 외란에 대한 Integral of the time weighted absolute error (ITAE)방법이다.

지금까지 설명한 비례제어기를 이용한 자동조절 방법은 근사적인 방법을 사용하였고 또한 수치 해석적인 방법을 필요로 한다. 그래서 Sung등[31]은 1994년에 근사적인 방법을 사용하지 않고 일차시간지연 공정에 비례제어기를 달았을 때 지배방정식을 구체적으로 풀었다. 그리고 구해진 지배방정식을 이용하여 수치해석적인 기법을 사용하지 않고 간단하게 일차시간지연모델을 구할수 있는 방법을 제시하였다. 그것은 다음과 같다.

$$K_m = \frac{C_{\infty}}{u_{\infty}} = \frac{C_{\infty}}{K_c(C_s - C_{\infty})} \quad (12)$$

$$b = - \ln \left[\frac{C_{p1}/C_s - K_m K_c + (K_m K_c)^2}{(K_m K_c)^2} \right] \quad (13)$$

$$\alpha = -\ln(K_m K_c b) \quad (14)$$

$$\theta_m = \frac{t_{\rho 1}}{2 + b/a} \quad (15)$$

$$\tau_m = \theta_m / a \quad (16)$$

이렇게 구해진 일차시간지연모델은 공정이 일차시간지연 일 경우 정확한 모델을 제시해준다. 이 방법은 아주 간단함에도 불구하고 모사결과 지금까지 언급한 비례제어기 방법보다 계단형설정치변화에 대해 비슷하거나 우수한 제어성능을 보인다.

지금까지 비례제어기를 이용하여 일차시간지연 모델을 구해서 제어기의 조절변수를 구하는 자동조절방법들에 대해 알아보았다. 이렇게 설정치 변화를 주어 공정을 활성화시키는 개념은 1995년에 Sung과 Lee[32]에 의해 pH공정의 모델링에 사용되기도 한다. 그런데 이 방법의 큰 단점 중에 하나가 사용자가 공정출력이 그림 4b처럼 저감쇠진동(Under-damped)반응을 보이도록 비례제어기의 비례이득을 정해야 한다는 점이다. 만약 사용자가 비례이득을 너무 작은 값으로 선택을 할 경우 그림 4b 같은 공정출력이 아닌 감쇠진동(Over-damped)반응을 보이게 되어 지금까지의 모든 이론은 적용될 수 없다. 그리고 일차시간지연 모델을 이용하여 공정을 표현하기에는 공정이 너무 복잡한 경우가 많다. 예로 공정이 저감쇠진동(Under-damped)시스템일 경우 감쇠진동(Over-damped)시스템인 일차시간지연모델로 근사하기에는 너무 오차를 많이 가지며 공정이 고차일 경우 제어기가 동작하는 전 영역의 주파수 범위를 표현하기에는 많은 오차의 소지를 가지고 있다. 예로, 계단형 설정치 변화에 대해서는 제어기가 낮은 주파수 영역에서 동작하기 때문에 모델 역시 공정의 낮은 주파수 영역에 해당되는 부분을 집중적으로 근사해야 한다. 반면 계단형 공정입력외란(Step process input disturbance) 혹은 낮은 주파수의 설정치나 외란에 좋은 제어기는 보다 높은 범위의 주파수 영역을 사용하게 되기 때문에 모델 역시 공정의 높은 주파수 영역을 집중적으로 근사해야 한다. 그런데 일차시간지연모델은 너무 단순하여 공정의 낮은 주파수와 높은 주파수 영역을 동시에 잘 묘사할 수 없다. 그래서 하나의 일차시간지연 모델을 사용하여 설정치 변화와 입력형 외란 제거에 동시에 좋은 성능을 보장하는 제어기를 디자인 하기는 사실상 어렵다.

원하는 주파수 영역을 구하기 위해 릴레이를 이용한 자동조절방법에서는 필터를 사용한다든지 히스테리시스를 주는 방법이 몇몇 소개되고 있다. 예로 1995년에 Kim[33]은 릴레이를 줄 때 고의의 시간지연을 주어 원하는 주파수 영역의 정보를 구해내고자 하였다. 만약 시간지연을 $\theta_{addition}$ 만큼 릴레이 출력에 가하면 아래와 같은 식이 성립된다. 즉 릴레이

이 공정의 전달함수에 시간지연을 곱한 전달함수의 임계(Ultimate)정보를 제공해 준다.

$$-\pi = \angle G_p(j\omega) - \theta_{addition}\omega$$

$$\omega = 2\pi/p_r$$

여기서 $\angle G_p(j\omega)$ 는 공정의 상지연(Phase lag)을 나타내고 $-\theta_{addition}\omega$ 는 고의의 시간지연에 의한 상지연(Phase lag)이다. 그리고 ω 에서 공정의 Amplitude Ratio(AR)는 $(\pi a)/(4d)$ 가 된다. 여기서 만약 확인하고자 하는 공정의 주파수 영역이 -135° 라면 $\theta_{addition}$ 으로서 $p_r/8$ 을 선택하면 된다. 즉 위식에 의해

$$\angle G_p(j\omega) = -\pi + \pi/4$$

이 성립하여 이 릴레이 실험에서 구해낸 공정의 Amplitude Ratio와 주기는 공정의 상지연(Phase lag)이 -135° 에 해당하는 정보이다. 이렇게 하여 원하는 주파수 혹은 상지연(Phase lag)의 영역을 집중적으로 모델링 할 수 있다. 그러나 이 방법 역시 Nyquist plot에서 한 점만을 모델링하기 때문에 여러 주파수에서의 데이터를 이용하여 전달함수를 따로 구하지 않는 한 좋은 제어성능을 보장할 수 있는 제어기조절은 힘들다.

현재 이차시간지연을 이용하여 공정의 보다 넓은 주파수 영역을 잘 표현할 수 있는 방법들이 제시되고 있다. 1993년에 Hwang은[34]은 공정의 모델로서 하나의 영점(Zero) 가진 이차모델을 사용하여 저감쇠진동시스템(Under-damped system)을 보다 효과적으로 처리하였다. 그리고 그가 사용한 모델에 대해 dominant pole지정을 통한 비례-적분-미분제어기의 조절방법을 제시하였다. 그러나 이방법은 공정이 큰 시간지연을 가질 경우 적용될 수 없고 조절방법 역시 감쇠비(Decay ratio)를 근거로 Pole을 지정하였기 때문에 최적의 해와는 거리가 먼 조절변수를 줄 수 있다. 1990년에 Lee[35] 등은 이차시간지연모델을 사용하여 공정을 모델링하는 방법과 이 모델에 대해 비례-적분-미분 제어기의 조절방법을 동시에 제시하였다. 이 방법은 저감쇠진동(Under-damped)시스템과 고차의 공정을 잘 묘사할 수 있고 계단형 설정치 변화에 대해 기존의 방법과 비교해서 매우 우수한 제어성능을 보인다. 그러나 이 방법은 계단형 공정입력외란의 제거를 위해서는 그 제어기 조절방법(Tuning method)의 성능이 나쁘고 모델링 작업과 조절변수(Tuning parameters)를 구하는 과정에서 수치해석적 기법과 최적화 개념을 이용하기 때문에 현실적인 적용에 있어 문제점을 가지고 있다. 다음으로 1995년에 Hwang[36] 이 이차시간지연모델을 확인할 수 있는 방법으로 설정치에 릴레이를 작용하는 방법과 비례-적분-미분 제어기를 확인용신호로서 바로 사용하는 방법을 동시에 제시하였다. 이 방법의 기여라면

설정치에 릴레이를 작용시키는 방법에서는 한 번의 실험으로 이차시간지연모델을 구할 수 있다는 점과 비례-적분-미분 제어기를 바로 확인용 신호로 사용하는 방법에서는 비례-적분-미분 제어기에 단지 계단형 설정치 변화만을 주어 이차시간 모델을 구할 수 있기 때문에 따로 확인용 신호를 발생시킬 필요가 없다는 점이다. 전자의 경우 공정을 확인하는데 소비되는 시간을 줄인다는 점에서 후자의 경우는 제어와 동시에 공정을 확인한다는 개념에서 상당히 진보적이다. 그러나 이 방법 역시 연구의 지향 점은 매우 좋으나 모델링 과정에 있어 현실적인 문제점을 가지고 있다. 전자의 경우 비례-적분-미분 제어기의 조절변수가 어느 정도 좋은 제어 성능을 보여야 한다. 즉 제어기의 성능이 좋지 않을 경우 설정치에 릴레이를 걸면 공정출력은 Sine신호와 상당한 차이를 보이게 되기 때문에 임계(Ultimate)정보의 정확도가 상당히 떨어질 수 있고 모델링을 하는 과정에서도 복잡한 수치 해석적 기술이 요구된다. 그리고 후자의 경우 비례-적분-미분 제어기를 사용하여 확인용 신호를 발생시킬 경우 활성화된 공정출력을 근사하는 식은 4개의 비선형 연립방정식을 풀어야 구해진다. 그리고 구조적으로 근사식과 공정출력이 맞지 않을 경우 근사식의 정확도를 믿을 수 없게 되며 사용자가 저감쇠진동(Under-damped)의 공정출력을 보장하기 위해 비례-적분-미분 제어기의 이득과 시간을 정해주어야 하는데 이 작업은 상당히 비합리적이다. 또한 제어기의 조절방법 역시 사용자가 지정해주어야 하는 것이 많고 최적해와 거리가 있다.

2.3 릴레이와 비례제어기를 접목한 자동조절 방법

릴레이와 비례제어기를 접목하여 공정의 모델을 일차시간 지연에서 이차시간지연모델까지 확장하고 비례제어기 방법의 단점을 보완할 수 있다. 이 방법은 Sung(1995)등[37]이 제시한 방법으로 처음에 릴레이를 이용하여 공정의 임계(Ultimate)정보를 얻어내고 다음으로 비례제어기 방법을 연속으로 사용하여 앞에서 구한 정보와 비례제어기방법에서 측정된 값들을 이용하여 이차시간지연모델을 구해내는 방법이다. 또한 그들은 이차시간지연모델에 대한 조절방법을 제시하였는데 이 방법은 최적조절 방법과 거의 같은 성능을 내고 있다. 이들이 제시한 조절방법은 이차시간지연모델과 비례-적분-미분 제어기가 아래와 같을 때 표 1에 나타나 있다.

그림 5와 같이 Phase 1에서는 릴레이를 이용하여 Phase

$$G_m(s) = \frac{k_m \exp(-\theta_m s)}{\tau_m^2 s^2 + 2\tau_m \xi_m s + 1} \quad (17)$$

$$G_c(s) = k_c \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s\right) \quad (18)$$

표 1. 이차시간지연모델에 대한 비례-적분-미분 제어기의 조절방법.

<p>Step set point change :</p> $k_m k_c = -0.04 + (0.333 + 0.949 \left(\frac{\theta_m}{\tau_m}\right)^{-0.983}) \xi_m, \xi_m \leq 0.9$ $k_m k_c = -0.544 + 0.308 \left(\frac{\theta_m}{\tau_m}\right) + 1.408 \left(\frac{\theta_m}{\tau_m}\right)^{-0.832} \xi_m, \xi_m > 0.9$ $\frac{\tau_i}{\tau_m} = [2.055 + 0.072 \left(\frac{\theta_m}{\tau_m}\right)] \xi_m, \frac{\theta_m}{\tau_m} \leq 1$ $\frac{\tau_i}{\tau_m} = [1.768 + 0.329 \left(\frac{\theta_m}{\tau_m}\right)] \xi_m, \frac{\theta_m}{\tau_m} > 1$ $\frac{\tau_d}{\tau_m} = \left\{1 - \exp\left(-\frac{\left(\frac{\theta_m}{\tau_m}\right)^{1.060} \xi_m}{0.870}\right)\right\} [0.55 + 1.683 \left(\frac{\theta_m}{\tau_m}\right)^{-1.060}]$
<p>Step input disturbance rejection :</p> $k_m k_c = -0.67 + 0.297 \left(\frac{\theta_m}{\tau_m}\right)^{-2.001} + 2.189 \left(\frac{\theta_m}{\tau_m}\right)^{-0.766} \xi_m, \frac{\theta_m}{\tau_m} < 0.9$ $k_m k_c = -0.365 + 0.260 \left(\frac{\theta_m}{\tau_m} - 1.4\right)^2 + 2.189 \left(\frac{\theta_m}{\tau_m}\right)^{-0.766} \xi_m, \frac{\theta_m}{\tau_m} \geq 0.9$ $\frac{\tau_i}{\tau_m} = 2.212 \left(\frac{\theta_m}{\tau_m}\right)^{0.520} - 0.3, \frac{\theta_m}{\tau_m} < 0.4$ $\frac{\tau_i}{\tau_m} = -0.975 + 0.910 \left(\frac{\theta_m}{\tau_m} - 1.845\right)^2$ $+ \left\{1 - \exp\left(-\frac{\xi_m}{0.15 + 0.33 \left(\frac{\theta_m}{\tau_m}\right)}\right)\right\} [5.25 - 0.88 \left(\frac{\theta_m}{\tau_m} - 2.8\right)^2], \frac{\theta_m}{\tau_m} \geq 0.4$ $\frac{\tau_d}{\tau_m} = -1.9 + 1.576 \left(\frac{\theta_m}{\tau_m}\right)^{-0.530}$ $+ \left\{1 - \exp\left(-\frac{\xi_m}{-0.15 + 0.939 \left(\frac{\theta_m}{\tau_m}\right)^{-1.121}}\right)\right\} [1.45 + 0.969 \left(\frac{\theta_m}{\tau_m}\right)^{-1.171}]$

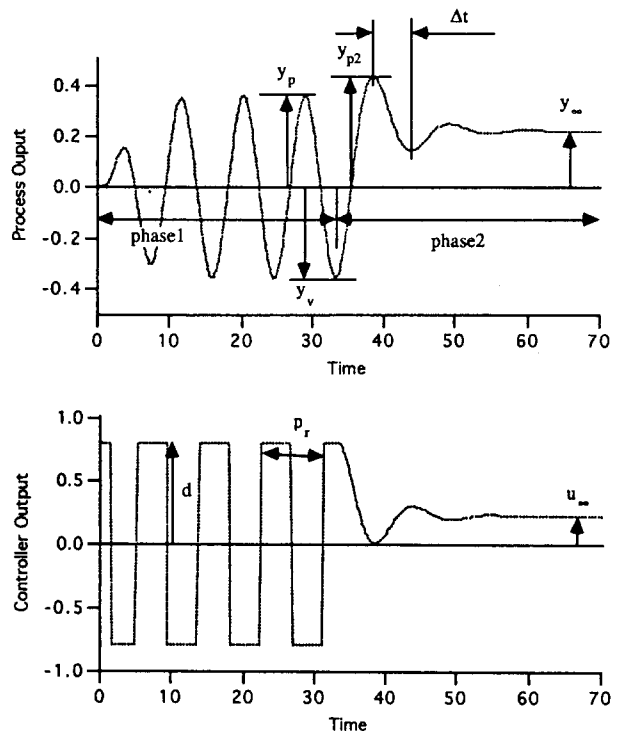


그림 5. 릴레이와 비례제어기를 접목한 자동조절 방법.

2에서는 비례제어기를 이용하여 공정을 활성화시킨다. 비례 제어기를 이용한 방법은 비례제어기의 비례이득을 결정해 주어야 하는 단점이 있으나 이 방법은 Phase 1에서 얻은 정보를 이용하여 저감쇠진동(Under-damped)의 공정출력을 보장할 수 있는 비례이득을 자동적으로 설정하고 있다. 즉 Phase 2에서 사용되는 비례제어기는 아래와 같은 형태를 가진다.

$$u(t) = d - k_c(y + y_v) \quad (19)$$

$$k_c = \beta \frac{Ad}{\pi a} \quad (20)$$

여기서 β 는 0.35정도를 권장한다. (20)은 공정의 안정성(Stability)과 저감쇠진동(Under-damped)형의 공정출력을 보장하기 위한 것으로 앞에서 릴레이를 이용한 임계이득(Ultimate gain)의 β 배를 비례제어기의 비례이득(Proportional gain)으로 취하는 의미가 있다. 이론적 전개에 있어 사용된 원리 또는 가정은 첫째로 개루프의 임계주파수(Critical frequency)가 폐루프의 임계주파수와 같다는 것이고 둘째가 시간지연항을 이차Taylor series를 이용하여 상당히 잘 근사할 수 있다는 것이다. 셋째가 릴레이를 통해 얻은 데이터가 비교적 정확하다는 가정이다. 셋째 가정에서 임계주파수는 실제로 상당히 정확한 것으로 알려져 있다. 이 방법 역시 비례제어기에 의해 제어되는 Phase 2에서 설정치에 대한 공정출력을 이차시간지연모델로 표현한 다음 이것으로부터 공정의 이차시간지연모델을 구한다. 먼저 Phase 2에서 설정치에 대한 공정출력은 아래와 같은 이차시간지연으로 표현될 수 있다[30].

$$\frac{y(s) + y_v(s)}{y_s(s) + y_r(s)} = \frac{(y_{ss} + y_v) \exp(-\theta_o s)}{\pi_o^2 s^2 + 2\pi_o \xi_o s + 1} \quad (21)$$

$$\xi_o = - \frac{\ln \left(\frac{y_{p2} - y_{ss}}{y_{ss} + y_v} \right)}{\sqrt{\pi^2 + \left[\ln \left(\frac{y_{p2} - y_{ss}}{y_{ss} + y_v} \right) \right]^2}} \quad (22)$$

$$\tau_c = \Delta t \frac{\sqrt{1 - \xi_o^2}}{\pi} \quad (23)$$

$$\theta_c = \frac{\pi + \arctan 2(-2\tau_c \omega_r \xi_o, 1 - \tau_c^2 \omega_c^2)}{\omega_r} \quad (24)$$

$$\omega_r = 2\pi / p_r \quad (25)$$

여기서 (24)는 폐루프의 임계주파수(Critical frequency)가 개루프의 임계주파수와 같다는 원리를 이용하여 유도된 것이다. 여기서 공정의 모델이 이차시간지연일 경우 아래와 같은 식이 성립된다.

$$\frac{y(s) + y_v(s)}{y_s(s) + y_r(s)} = \frac{(y_{ss} + y_v) \exp(-\theta_m s)}{[\tau_m s^2 + 2\tau_m \xi_m s + 1 + k_c k_m \exp(-\theta_m s)] / (1 + k_c k_m)} \quad (26)$$

(26)과 (21)이 같아야 한다는 조건으로 부터 아래의 식을 얻을 수 있다. 이때 이차 Taylor series를 이용하여 시간지연항을 처리하였다.

$$k_m = y_{ss} / u_{ss} \quad (27)$$

$$\theta_m = \theta_c \quad (28)$$

$$\tau_m = \sqrt{(1 + k_m k_c) \tau_c^2 - k_m k_c \theta_c^2} / 2 \quad (29)$$

$$\xi_m = [2(1 + k_m k_c) \tau_c \xi_c + k_m k_c \theta_c] / (2\tau_m) \quad (30)$$

즉 (27)-(30)으로 부터 공정의 이차시간지연모델이 구해진다. 이 방법의 장점이라면 비례제어기 방법의 비례이득을 자동으로 조절해줄 수 있고 이차시간지연모델을 구해내는데 있어 단순한 산술식만 처리하면 된다는 것이다. 또한 제어기의 조절방법도 단순한 산술식이고 조절결과가 최적치와 거의 같으며 설정치의 변화뿐 아니라 공정입력형 외란에 대해서도 적용될 수 있는 점이다. 그림 6을 고려하자. 그들은 3단짜리의 반응기에 있어 마지막 수위를 제어하기 위한 비례-적분-미분 제어기의 자동조절을 위해 이 방법을 적용하였다. 여기서 Serial Communication을 이용하는 AD/DA 컨버터를 사용하여 DP cell로부터 수위를 읽고 퍼스널

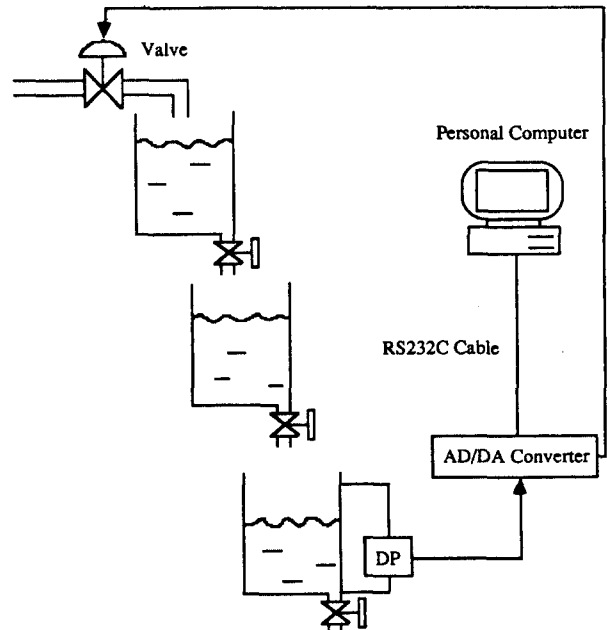


그림 6. 액위제어를 위한 실험장치.

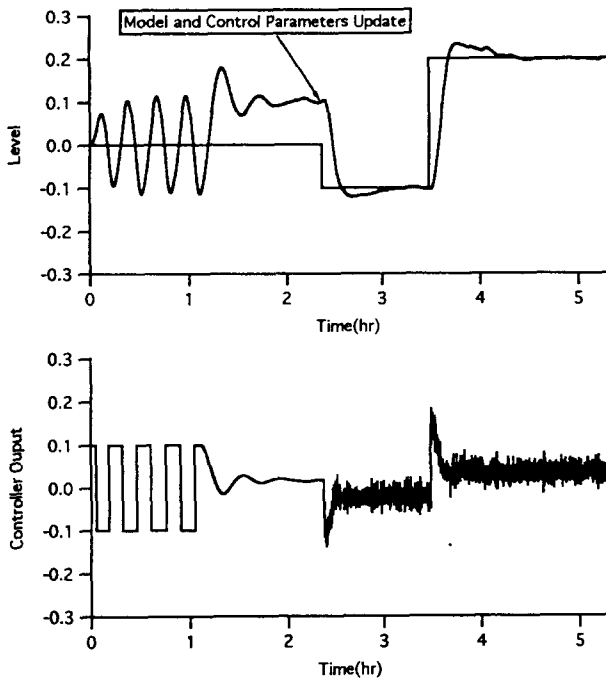


그림 7. 릴레이와 비례제어기를 접목한 방법의 자동조절 결과.

컴퓨터에서 제어기의 자동조절과 비례-적분-미분 제어를 수행하였다. 실험결과가 그림 7에 나타나 있다. 좋은 자동조절과 제어성능을 보인다. 이 방법은 두 가지 방법을 접목함으로써 보다 많은 공정의 정보를 얻어 이차시간지연모델을 구했고 또한 비례제어기 방법의 단점을 극복하였다. 그러나 이것 역시 따로 확인용 신호를 발생시키기 때문에 확인작업 동안 비례-적분-미분 제어기의 연속적인 제어가 불가능하다. 그리고 공정의 모델링과정에서 때로 수동조절을 할 경우나 밸브 등의 Actuator가 포화 될 때가 생기는데 지금까지 말한 방법 모두가 이런 점을 이론적으로 고려하지 못했기 때문에 구해진 모델은 상당히 부정확 할 수 있다.

2.4 확인용 신호의 형태에 무관한 자동조절 방법

이 방법을 위해서 현재 두가지 방법을 사용할 수 있는데 1992년에 Melo와Friedly에 의해 개발된 방법[38] 과 1995년에 Sung과 Lee[39]가 제시한 것으로 어떤 정형화된 형태의 릴레이나 비례제어기 같은 확인용신호를 이용하는 것이 아니라 공정을 활성화 시킬 수 있는 공정입력만을 요구한다. 그래서 비례-적분-미분 제어기를 확인용신호로 사용할 수도 있고 수동조절에 의한 제어출력도 가능하며 Actuator의 포화로 인한 비선형성 제어출력도 사용할 수 있다. 먼저 Melo와Friedly(1992)는 공정의 Bode plot을 수치미분과 수치적분을 이용하여 그리려는 시도를 하였다. 그들은 단지 Bode plot을 그리는데 까지만 연구를 제한하였지만 그들의 방법은 쉽게 비례-적분-미분 제어기의 자동조절

에 응용될 수 있다. 그들의 아이디어는 매우 간단하다. 다음의 식을 고려하자.

$$G_p(s) \Big|_{s=j\omega} = \frac{y(s) \Big|_{s=j\omega}}{u(s) \Big|_{s=j\omega}} = \frac{sy(s) \Big|_{s=j\omega}}{su(s) \Big|_{s=j\omega}} \quad (31)$$

$$= \frac{\int_0^{\omega} \frac{dy(t)}{dt} \exp(-j\omega t) dt}{\int_0^{\omega} \frac{du(t)}{dt} \exp(-j\omega t) dt}$$

(31)에서 $G_p(s)$ 는 공정의 전달함수를, $y(t)$ 와 $u(t)$ 는 각각 공정출력과 제어출력(혹은 확인용 신호)을 나타낸다. 만약 수치미분을 통해서 $dy(t)/dt$ 와 $du(t)/dt$ 를 구한다면 수치적분을 이용해 쉽게 (31)으로 부터 $G_p(j\omega)$ 를 구할수 있다. 여기서 제어출력과 공정출력의 미분값이 정상상태에 접근하게 됨에 따라 0으로 접근하기 때문에 0에서 무한대까지의 수치적분이 가능하다는 것을 유의하기 바란다. 이것이 바로 Bode plot을 그리는데 있어 공정출력보다는 공정출력의 미분을 사용하는 이유이다. 이렇게 하여 일단 시간에 따른 공정출력과 제어출력(확인용 신호)의 미분 값들을 구했으면 여러 ω 값에 대해 $G_p(j\omega)$ 를 구할수 있기 때문에 공정의 Bode plot을 그릴수 있다. 이렇게 하여 그려진 Bode plot으로 부터 모델감소 등을 이용하여 비례-적분-미분 제어기의 조절을 위한 일차시간지연이나 이차시간지연모델을 구할수 있다(이 단락의 끝부분에 부가 설명이 있음). 그러나 이 방법은 수치미분을 사용하기 때문에 공정이 상당한 노이즈를 가지고 있을 경우 구해진 Bode plot의 정확도는 떨어지고 공정이 정상상태에 도달해야만 수치적분이 완전할수 있어 모델링 작업이 끝날 수 있다. 이 방법은 원래 제어출력을 직접 이용하지 않고 제어출력대신 제어기의 설정치 변화를 이용하여 이론적 전개를 하였으나 기본적인 개념은 같다.

1995년 Sung과Lee[39] 방법 역시 기본적인 원리는 상당히 간단하다. 다음의 Laplace변환을 고려하자.

$$y(s) = \int_0^{\infty} \exp(-st)y(t)dt \quad (32)$$

$$u(s) = \int_0^{\infty} \exp(-st)u(t)dt \quad (33)$$

여기서 $y(t)$ 와 $u(t)$ 는 각각 공정출력과 제어출력을 말한다. 그리고 공정의 전달함수는 아래와 같은 형태를 가진다.

$$G_p(s) = y(s) / u(s) \quad (34)$$

다음으로 공정이 아래와 같은 고차시스템이라고 가정하자.

$$G_m(s) = \frac{n_m s^m + n_{m-1} s^{m-1} + \dots + n_1 s + n_0}{d_n s^n + d_{n-1} s^{n-1} + \dots + d_1 s + 1} \quad (35)$$

여기서 n 과 d 를 구해내는 것이 목적이다. 이것을 위해 (32)와(33)에서 수치적분으로 어떤 s 값에 대해 $y(s)$ 와 $u(s)$ 를 계산할 수 있다. 즉

$$y(s_i) = \sum_{t=0}^{t_{end}} \frac{\exp(-s_i t) - \exp(-s_i(t+\Delta t))}{s_i} y(t) \quad (36)$$

$$u(s_i) = \sum_{t=0}^{t_{end}} \frac{\exp(-s_i t) - \exp(-s_i(t+\Delta t))}{s_i} u(t) \quad (37)$$

$$G_p(s_i) = y(s_i) / u(s_i) \quad (38)$$

여기서 Δt 는 샘플링 시간이고 t_{end} 는 충분히 큰값이다. 여러 값의 s_i 에 대해 $G_p(s_i)$ 를 구했기 때문에 (35)의 $G_m(s_i)$ 대신에 $G_p(s_i)$ 를 대입하고 s 대신에 s_i 를 대입하면 최소자승법을 이용하여 바로 모델의 계수 n 과 d 를 구할 수 있다. 여기서 s_i 는 공정의 모델링 작업에 있어 해당되는 신호에 대한 일종의 시간에 따른 가중치라고 생각할 수 있다. 그래서 아래와 같은 값을 권장한다. 여기서 s_i 는 등간격으로 배치되어 있다.

$$s_0 = 1/\tau_{max} < s_1 < s_2 < \dots < s_{ns} = 1/\tau_{min} \quad (39)$$

여기서 τ_{min} 은 고려해주고자 하는 최초공정출력에 해당하는 최소시간으로 대체로 시간지연과 비슷한 값으로 정하면 되고 τ_{max} 는 고려해주고자 하는 마지막 공정출력에 해당하는 최대시간을 말하는데 대체로 공정의 시상수에 해당하는 값을 권장한다. 그러나 s 범위가 상당히 달라도 모델링 효과는 크게 영향을 받지 않는다. 그리고 ns 는 $2(m+n)$ 의 정도면 충분하고 m 과 n 은 각각 5와 3정도면 보통공정을 충분한 정확도로 묘사할 수 있다. 여기서 주의해야 할 점은 (36)와 (37)에서 적분을 하는 시간은 아래와 같은 조건 즉 $\exp(-s_i t)$ 가 거의 0으로 떨어질 때까지 적분해야 정확도가 보장된다.

$$\exp(-s_i t_{end}) \leq \text{약 } 0.00001 \quad (40)$$

이렇게 하여 고차 모델을 얻을 수 있다. 이 방법은 적분과 최소자승법을 사용하기 때문에 측정에 있어 상당한 노이즈가 들어와도 모델링 효과에는 거의 영향을 받지 않으며 공정에 비선형성이 있어도 합리적인 모델링 효과를 보인다. 비례-적분-미분 제어를 조절하기 위해서는 구해진 이 모델을 이용하여 Bode plot을 그릴수 있고 다시 이것으로부터 이차시간지연이나 일차시간지연모델을 구해낼수 있다. 이것은 아래와 같은 방법으로 간단히 해결할 수 있다(Melo와 Friedly(1992)의 방법도 마찬가지다).

$$G_m(s) \approx G_{r,m}(s) = \frac{k_m \exp(-\theta_m s)}{\tau_m^2 s^2 + 2\tau_m \xi_m s + 1} \quad (41)$$

$$|G_m(s)| \approx \left| \frac{k_m \exp(-j\theta_m \omega)}{1 - \tau_m^2 \omega^2 + j2\tau_m \xi_m \omega} \right| = \frac{k_m}{|1 - \tau_m^2 \omega^2 + j1_m \xi_m|} \quad (42)$$

$$k_m = G_m(0) \quad (43)$$

여기서 r - m 은 감소된 모델(Reduced model)을 나타내는 첨자이다. (42)은 아래와 같은 선형으로 바뀔 수 있고 여러 값의 ω 에 대해 최소자승법을 사용하여 이차시간 지연모델의 시상수와 진동인자(Damping factor)를 구할 수 있고 [40,41,42,43] 이때 ω 의 범위를 다음과 같이 권장한다. 그리고 ω_i 는 등간격으로 배치되어 있다.

$$\tau_m^4 |G_m(j\omega_i)|^2 \omega_i^4 + (4\tau_m^2 \xi_m^2 - 2\tau_m^2) \omega_i^2 |G_m(j\omega_i)|^2 = k_m^2 - |G_m(j\omega_i)|^2 \quad (44)$$

$$0 < \omega_0 < \omega_1 < \dots < \omega_n \quad (45)$$

여기서 ω_u 는 임계주파수(Critical frequency)를 나타낸다. 시간지연은 (46)을 이용하여 구한다. (46)은 ω_u 에서 상지연(Phase lag)이 $-\pi$ 라는 사실에서 쉽게 유도 된다.

$$\theta_m = \frac{\pi + \arctan 2(-2\tau_m \xi_m, 1 - \tau_m^2 \omega_u^2)}{\omega_u} \quad (46)$$

이렇게 모델차수감소를 이용하여 이차시간지연모델을 구해내고 표1의 조절방법을 이용하여 비례-적분-미분 제어기의 조절변수를 결정할 수 있다. 일차시간지연모델로의 차수감소도 같은 방식을 사용할 수 있다. 그림 8에 그림 6의 공정을 이 방법을 사용하여 자동조절한 결과가 나와있다. 초기에는 성능이 좋지 않은 비례-적분-미분 제어기에 설정치 변화를 주어 공정을 활성화시켜 필요한 데이터를 얻는다. 다음으로 자동조절을 하고 설정치를 두 번 바꾸었다. 두 번

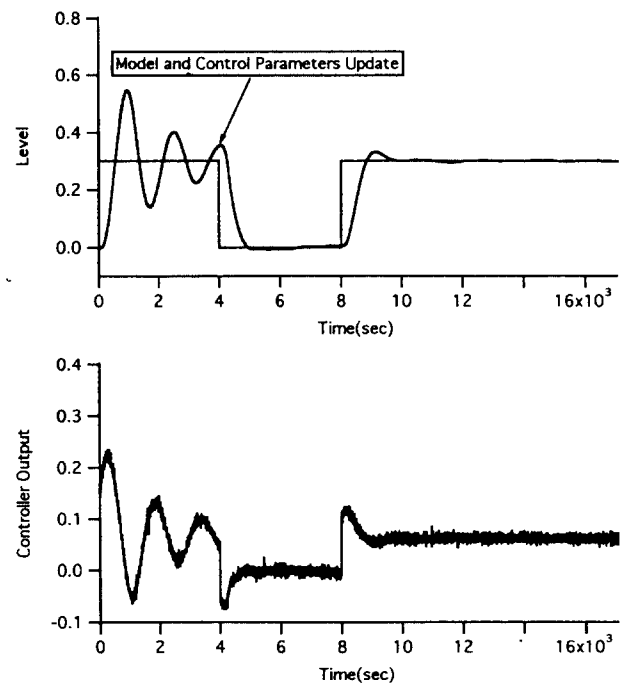


그림 8. 공정입력과 출력을 바로 이용하는 방법의 자동조절 결과.

제와 세 번째의 설정치 변화에 대해 자동 조절된 비례-적분-미분 제어기는 매우 좋은 제어 성능을 보이고 있다. 마지막으로 소개한 이 방식은 어떤 정형화된 확인용 신호가 필요 없다는 장점을 가지고 있고 측정에 있어 상당한 노이즈가 있어도 좋은 모델을 공급한다는 측면에서 기존의 방법에 비해 탁월하다.

3. 토론 및 결론

자동조절을 위해 특히 주의해야 할 것은 Actuator의 정밀도(Resolution)이다. 예를 들자면 공기압을 사용하는 밸브의 경우(Positioner가 없는 경우) 작은 양의 제어출력 변화량은 마찰력이나 Sticking으로 인해 무시되게 된다. 대체로 사용자의 입장에서 보면 자동조절을 위해서는 공정에 작은 변화를 주는 것이 합리적이다. 그런데 Actuator의 정밀도(Resolution)가 낮을 경우 작은 양의 제어출력변화를 Actuator는 무시하게 되고 이것은 심한 비선형성을 유발시킨다. 그 결과로 첫 번째 방법의 릴레이를 사용하는 경우 공정이 선형일 경우 한 주기내에서 두 개의 반주기는 정확히 같고 공정출력의 최대, 최소 값의 크기도 같지만 비선형일 경우 상당히 차이가 심해 공정출력과 릴레이 출력이 찌그러지게 된다. 이렇게 되면 Sine 신호와는 더욱 거리가 멀어지고 불확실성이 증대되어 구해진 데이터는 정확도를 잃게 된다. 그리고 비례제어기를 사용하는 경우도 선형공정에서는 볼 수 없는 현상들이 나타나는데 예로 첫 번째 피크는 상당히 큰데 두 번째 이상의 피크는 상당히 작은 경우나 혹은 매우 안정된 비례이득임에도 불구하고 작은 진동을 보이기도 한다. 이렇게 되면 공정모델은 실제보다 상당히 저감쇠진동(Under-damped)공정으로 확인된다. 그래서 Actuator의 정밀도를 유의해야 하고 공정을 활성화시키는 크기는 Actuator의 정밀도를 무시할 수 있을 정도로 크게 하여야 한다. 그러나 지나치게 공정의 활성화 크기를 크게 하면 제어가 동작하는 범위의 까지 근사를 하기 때문에 모델의 정확도가 떨어 질 수 있고 공정 자체가 운전 영역에 대해 민감하다면 공정에 좋지 않은 영향을 줄수도 있다.

지금까지 서술한 4가지 형태의 자동조절방식에 대해 요약하자면 다음과 같다. 첫째는 구형파(Square wave) 형태의 확인용신호를 Fourier series를 이용하여 Sine신호로 근사를 할 수 있다는 원리에 근간을 둔 릴레이 형태의 제어출력을 이용한 방법이었으며 둘째가 비례제어기를 이용하여 확인용 신호를 얻고 페루프 공정을 이차시간지연모델로 근사한 다음 역으로 개루프 공정 즉 모델링하고자하는 공정을 일차시간지연 혹은 이차시간 지연모델로 근사시키는 방법을, 세 번째가 두 가지를 접목한 방법, 네 번째가 적당히 공정을 활성화 시킬 수 있는 임의 형태의 제어기 출력을 이용하는 방식이었다.

첫 번째 방법은 제어입장에서 볼 때 공정의 고주파수 영역을 집중적으로 모델링 하기 때문에 저주파수를 사용하는 계단형 설정치변화공정의 제어시 모델링 에러가 커질 수 있다. 상대적으로 느린 설정치 변화이나 공정입력형 외란제거를 위한 공정에 대해서는 제어가 고주파수의 출력을 내어야 하기 때문에 모델링관점에서 보면 이 방법은 합리적이다. 공정모델로서 일차시간지연모델을 사용할 경우 두 번째 방법은 비례제어기에 설정치 변화를 주어 공정을 확인하기 때문에 저주파의 확인용 신호가 발생되어 공정의 모델 또한 저주파 영역을 집중적으로 확인하기 때문에 계단형 설정치 변환공정에는 합리적이지만 느린 설정치 변화나 외란의 제거를 위해서는 좋지 않다. 그러나 대체로 이차시간지연모델은 보통의 화학공정을 대부분의 경우 잘 묘사 할 수 있기 때문에 공정의 모델로 이차시간지연모델을 사용할 경우 그리고 확인용 신호가 여러 주파수 영역을 가지고 있다면 이런 문제는 어느 정도 무시할 만하다.

첫 번째와 세 번째 방법은 릴레이의 크기를 결정해주어야 하는 반면 두 번째 방법은 비례제어기의 비례이득을 적당히 결정해 주어야 한다는 단점이 있다. 첫 번째, 두번째, 세번째 방식은 어떤 몇몇 점의 데이터를 측정하기 때문에 측정 노이즈가 심한 공정에서는 사용할 수 없는 반면 네 번째 방식은 이것을 쉽게 극복할 수 있다. 그리고 가장 간단한 방법은 첫 번째 방법이고 네 번째 방법은 계산 양이 상대적으로 많다. 결론적으로 굳이 좋은 제어성능을 요구하지 않는다면 가장 간단하고 쉬운 릴레이 형태를 이용하는 자동조절 방법을 권장하고 운전조건이나 영역이 까다롭거나 제한적이며 좋은 제어성능을 요구하는 공정일 경우 네 번째 방법을 추천한다.

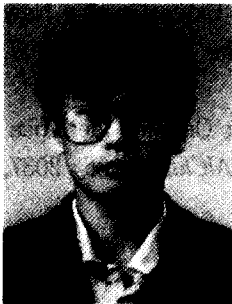
참 고 문 헌

- [1] K.J, Astrom;T., Hagglund, Automatic Tuning of Simple Regulators with Specifications on Phase and Amplitude Margins, *Automatica*, 20,645,1984
- [2] J.G., Ziegler;N.B., Nichols, Optimum Setting for Automatic Controllers, *Transl. ASME*, 64, 759, 1942
- [3] C.C., Hang;K.J., Astrom;W.K., Ho, Relay Auto-tuning in the Present of Static Load Disturbance, *Automatica*, 29, 563, 1993
- [4] T.S., Schei, A Method for Closed Loop Automatic Tuning of PID Controllers, *Automatica*, 28, 587, 1992
- [5] G.A., Dumont ; J.M., Martin-sanchez;C.C., Zervos, Comparison of an Auto-tuned PID Regulator and an Adaptive Predictive Control System on an In-

- dustrial Bleach Plant, *Automatica*, 25, 33, 1989
- [6] K.J., Astrom; T., Hagglund ; A., Wallenborg, Automatic Tuning of Digital Controllers with Applications to HVAC Plants, *Automatica*, 29, 1333, 1993
- [7] J., Lee; S.D., Lee ; Y.S., Kwon ; S., Park, Relay Feedback Method for Tuning of Nonlinear pH Control Systems, *AIChE J.*, 39, 1093, 1993
- [8] J., Lin ; C., Yu, Automatic Tuning and Gain Scheduling for pH Control, *Chem. Eng. Sci.*, 48, 3159, 1993.
- [9] J., Lee ; S.W., Sung, Comparison of Two Identification Methods for PID Controller Tuning, *AIChE J.*, 39, 695, 1993
- [10] W.L., Luyben, Derivation of Transfer Functions for Highly Nonlinear Distillation Columns, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 26, 2490, 1987
- [11] W., Li ; E., Eskinat ; W.L., Luyben, An Improved Autotune Identification Method, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 30, 1530, 1991
- [12] R., Chang; S., Shen; C., Yu, Derivation of Transfer Function from Relay Feedback Systems, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 31, 855, 1992
- [13] A.P., Loh ; V.U., Vasnani, Describing function matrix for multivariable systems and its use in multiloop PI design, *J. Proc. Cont.*, 4, 115, 1994
- [14] A.P., Loh ; C.C., Hang ; C.K., Quek ; V.U., Vasnani, Autotuning of Multiloop Proportional-Integral Controllers Using Relay Feedback. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 32, 1102, 1993
- [15] S., Shen; C., Yu, Use of Relay-Feedback Test for Automatic Tuning of Multivariable Systems, *AIChE J.*, 40, 627, 1994
- [16] W.L., Luyben, Simple Method for Tuning SISO Controllers in Multivariable Systems, *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 25, 654, 1986
- [17] T.J., Monica ; C., Yu ; W.L., Luyben, Improved Multiloop Single-Input/ Single-Output (SISO) Controllers for Multivariable Processes, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 27, 969, 1988
- [18] M., Friman ; K.V., Waller, Autotuning of Multiloop Control Systems, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 33, 1708, 1994
- [19] P., Lundstrom ; J.H., Lee ; M., Morari ; S., Skogestad, Limitations of Dynamic Matrix Control, *Automatica*, 19, 409, 1995
- [20] T., Hagglund ; K.J., Astrom, Industrial Adaptive Controllers Based on Frequency Response Techniques, *Automatica*, 27, 599, 1991
- [21] S.W., Sung ; J.H., Park ; I., Lee, Modified Relay Feedback Method, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 34, 4133, 1995
- [22] M., Yuwana ; D.E., Seborg, A New Method for On-Line Controller Tuning, *AIChE J.*, 28, 434, 1982
- [23] M., Morari ; E., Zafiriou, *Robust Process Control*; Prentice-Hall : Englewood Cliffs, NJ, 1989
- [24] A.M., Lopez ; J.A., Miller ; C.L., Smith ; P.W., Murrill, Controller Tuning Relationships Based on Integral Performance Criteria, *Instrum. Technol.*, 14 (12) 72, 1967
- [25] G.H., Cohen ; G.A., Coon, Theoretical Considerations of Retarded Control, *Trans. ASME*, 75, 827, 1953
- [26] A., Jutan ; E.S., Rodriguez II, Extension of a New Method for On-Line Controller Tuning, *Can. J. Chem. Eng.*, 62, 802, 1984
- [27] C., Chen, A Simple Method for On-Line Identification and Controller Tuning, *AIChE J.*, 35, 2037, 1989
- [28] J., Lee, On-Line PID Controller Tuning from a Single, Closed-Loop Test, *AIChE J.*, 35, 329, 1989
- [29] J., Jutan, A Comparison of Three Closed-Loop PID Tuning Algorithms, 35, 1912, 1989
- [30] D.R., Coughanowr, *Process Systems Analysis and Control*; MacGraw-Hill : New York, 1991
- [31] S.W., Sung ; H.I., Park ; I., Lee ; D.R., Yang, On-Line Process Identification and Autotuning Using P-Controller, *First Asian Cont. Conf.*, 1, 411, 1994
- [32] S.W., Sung ; I., Lee, pH Control Using a Simple Set Point Change, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 34, 1730, 1995
- [33] Y.H., Kim, PI Controller Tuning Using Modified Relay Feedback Method, *J. Chem. Eng. Japan*, 28 (1), 118, 1995
- [34] S., Hwang, Adaptive Dominant Pole Design of PID Controllers Based on a Single Closedloop Test, *Chem. Eng. Comm*, 124, 131, 1993
- [35] J., Lee ; W., Cho ; T.F. Edgar, An Improved Technique for PID Controller Tuning from ClosedLoop Tests, *AIChE J.*, 36, 1891, 1990
- [36] S., Hwang, Closed-Loop Automatic Tuning of Single-Input-Single-Output Systems, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 34, 2406, 1995

- [37] S.W., Sung ; J., O ; I., Lee ; S., Yi ; J., Lee, Automatic Tuning of PID Controller using Second-Order Plus Time Delay Model, submitted to *AIChE J.*, 1995
- [38] D.L., Melo ; J.C., Friedly, On-Line, Closed-Loop Identification of Multivariable Systems, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 31, 274, 1992
- [39] S.W., Sung ; I., Lee, On-Line Process Identification Method and Automatic Tuning of PID Controllers, submitted to *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1995
- [40] E.C., Levy, Complex curve fitting, *IRE Trans. Auto. Cont.*, AC-4, 37, 1959
- [41] A.H., Whitfield, Transfer function synthesis using frequency response data, *Int. J. Control.*, 43, 1413, 1986
- [42] C.K., Sanathanan ; J., Koerner, Transfer function synthesis as a ratio of two complex polynomials, *IEEE Trans. Auto. Cont.*, AC-8, 56, 1963
- [43] P.A., Payne, An improved technique for transfer function synthesis from frequency response data, *IEEE Trans. Auto. Cont.*, AC-15, 480, 1970

저 자 소 개



성 수 환

1969년 3월 5일생 1992년 경북대 공대 화학공학과 졸업.

1994년 포항공대 화학공학과 졸업(석사).

1996년 1월 현재 포항공대 화학공학과 박사과정 지능자동화 센터 연구원.

주요관심분야는 Predictive Control, PID Autotuning pH Control, On-line Process Identification.

(790-784) 경북 포항시 효자동 산 31번지, 포항공과대학교 화학공학과, 지능자동화 연구센터.

TEL. 0562) 279-2950, 279-2279 / FAX. 0562) 279-3499, 2699.



한 종 훈

1961년 9월 1일생. 1984년 서울대학교 화학공학과 졸업(공학사).

1986년 동 대학원 화학공학과 졸업(공학석사).

1994년 MIT 화학공학과 졸업(공학박사). 1987-1988년 KIST연구원.

1993년 Molten Metal Technology 선임 연구원.

1993-1995년 MIT Post-doc 연구원.

1995년-현재 포항공과대학교 화학공학과 교수.

주관심 분야는 공정 자동화, 지능 시스템, 실시간 조업 감시 및 진단 시스템.

(790-784) 경북 포항시 효자동 산 31번지, 포항공과대학교 화학공학과, 지능자동화 연구센터.

TEL. 0562) 279-2950, 279-2279 / FAX. 0562) 279-3499, 2699.