

# 적응제어방식 성능비교를 위한 실험실용 프로세스의 제작 및 실험

주성준\*      공재섭\*      박용식\*      김영철\*      양홍석\*

\* 서울대학교      공과대학 전기공학과

\* 충북대학교      공과대학 전기공학과

\* 명지대학교      공과대학 전기공학과

## Manufacture and Experiments of Thermal Process for Comparative Study of Adaptive control

S.J. Joo\*      J.S. Cong\*      Y.S. Park\*      Y.C. Kim\*      H.S Yang\*

\* Dept. of Electrical Eng. Seoul National University

\* Dept. of Electronic Eng. Chungbuk National University

\* Dept. of Electrical Eng. Myongji University

### Abstract

Most verification of improvements for adaptive control schemes are dependent on computer simulations, but these computer simulations have much limitation, because of complex actual conditions of system. This paper is concerned with the constructions of a thermal process system for experiments with various control schemes. This thermal process system is composed of a water tank, PC-XT, AD/DA converter, a power supply and thermal sensors. We estimate the algorithms of pole-assignment adaptive control in the manifold disturbances and environments, changing system dynamics. The system equations for thermal process are included.

### 1. 서론

산업 공정 제어계에서 고 정밀도, 고 신뢰도 요구가 증가됨에 따라 적응제어 방식의 실용화도 증대되고 있는 추세에 있다. 1980년대 이래 이 분야의 주요 관심은 외란, 모델불확실성(model uncertainty), 비선형성, 시변성, 미지 시변 지향 시간등에 대해 강인성(robustness)을 개선 시키는데 있었다. 그런데 제안된 적응방식의 성능 평가시, 주로 컴퓨터 시뮬레이션(simulation)에 의존하고 있으나 위의 요인들을 충분히 고려하기에는 한계가 있다. 예로서 시변, 비선형, 지연시간을 갖는 연속계를 디지털 컴퓨터로 처리하는 것은 곤란하다. 이러한 문제점은 비적응제어계에서도 마찬가지이다.

본 논문에서는 제어 성능과 안정성에 영향을 주는 여러 조건들을 다양하게 변화시킬 수 있는 실험실용 열 프로세스(thermal process)를 설계, 제작 하고, 온도 조절 시스템을 구성하여 실험한 결과를 나타내었다. 여기서는 강인한 적응 제어 알고리즘의 제안에 있는것이 아니라 그것을 실험실에서 쉽게 평가 해볼 수 있는 한 모의 시스템(mimic system)의 구성에 관한 것이다.

실험은 몇가지 형태의 적응제어기와 PID 제어기에 대해 적

용하였다. 이 시스템은 교육및 연구용으로 부분적으로 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

### 2. 열 프로세스 모델의 설계

#### 2.1 설계조건

실제 제어 대상에 가장 적합한 제어기를 설계 하는데는 모의 실험도 매우 중요한 과정이 된다. 그런데 컴퓨터 시뮬레이션은 서론에서 언급한 바와 같이 실제 환경과 부합되지 못할 수가 있다. 본장에서는 제어기의 몇가지 성능 평가를 실험적으로 수행해 볼 수 있는 열 프로세스를 설계하고자 한다.

이러한 열 프로세스는 궁극적으로 온도 조절 시스템 구성을 목적으로 하여, 어느 정도의 범용성을 갖기위해 설계조건에 다음 특성을 갖도록 고려하였다.

- P1 : 프로세스 차수는 2 이상일것.
- P2 : 비선형성을 가질것 .
- P3 : 계수의 시변성을 가질것
- P4 : 시변 지연 시간을 가질것.

이상의 특성은 제어계의 안정도 및 제어 성능을 악화시키는 요인 들로 제어기의 강인성 평가를 위한 시뮬레이션에 적절히 이용될 수 있을 것 이다.

#### 2.2 열 프로세스 의 사양

2.1 절의 설계조건을 만족하는 한 프로세스로서 우리는 그림 1과 같은 모델을 구성하였다.

덤펀이 있는 두개의 탱크와 탱크 상하단에서 유체가 상호 유통할 수 있도록 관으로 연결시킨 구조로 되어 있으며, 탱크 A 하부에는 1kW x 2개의 전열기가 장착되고, 탱크 B내부에는 냉각용 방열판이 들어 있다. 또 각탱크에는 유체의 온도를 측정하기 위한 온도 감지기를 부착하였고, 탱크간 연결관은 길이를 변경할 수 있는 구조이고, 또한 연결관에 취부된 밸브에 의해 순환류의 유량을 조정 할 수 있게 하였다.

탱크의 용량은 비열이 매우 큰 물을 넣었을 경우에 대해 전열기 최대 출력의 75% 인 1.5kw에서 온도 상승률 2-3 °C/min 이 되도록 설계하였다. 손실을 무시 하면 물의 양은 7-10 리터(liter) 가 되어 이것과 장착된 전열기의 크기를 고려하여 탱크 크기를 결정하였다.

열 프로세스의 각 부분 별 사양은 (표 1)과 같으며 < 그림 2>는 실제로 제작된 모델을 보여준다.

표 1. 열 프로세스의 사양

Table 1. specification of thermal process

부 분 품 명	크 기	및	재 질
Tank 크기 A	150	x	350 x 300
Tank 크기 B	60	x	100 x 300
Tank 재질	5 mm		철 판
연결 Tube A	직경 1 inch, 길이		50 mm x 2
연결 Tube B	직경 1 inch, 길이		100 mm x 2
Heater	Double		U - type
	100 V		1 kW x 2
온도 입력기	RTD type : pt 100 Ω x 2		

### 2.3 열 프로세스의 동적 모델링

2.1 절의 설계조건을 고려하여 제작된 그림1 의 프로세스가 실제로 조건 p1 - p4의 성질을 갖는지를 동적 모델링을 통해서 검증하고자 한다.

그림 1에서, 순환 연결관에서 열손실을 무시하기로 하고, 각 탱크와 방열기의 온도는 측정위치에 따라 다르지만 감지기의 측정온도가 각부의 평균온도라는 가정하에 탱크 A, B에서 에너지 평형식을 세우면 다음과 같다.

$$V_a \rho_a C_v \frac{dT_a(t)}{dt} = q_t \rho_b C_p T_b(t) - q_t \rho_a C_p T_a(t) + u(t) - w_1(t) \quad (2.1)$$

$$w_1(t) = K_1 A_a [ T_a(t) - T_a(t) ] \quad (2.2)$$

$$V_b \rho_b C_v \frac{dT_b(t)}{dt} = q_t \rho_a C_p T_a(t) - q_t \rho_b C_p T_b(t) - K_2 A_c [ T_b(t) - T_c(t) ] - w_3(t) \quad (2.3)$$

$$w_3(t) = K_3 A_b [ T_b(t) - T_a(t) ] \quad (2.4)$$

여기서

- $V_a, V_b$ : 탱크 A, B의 액체의 부피 [m<sup>3</sup>]
- $\rho_a, \rho_b$ : 액체의 각 탱크에서의 온도 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]
- $C_v, C_p$ : 정적비열, 정압비열 [J/kg-°C]
- $u(t)$ : 전열기의 출력 [J/sec]
- $A_a, A_b, A_c$ : 탱크 A, B와 방열기의 열전달면적 [m<sup>2</sup>]

$T_a, T_b, T_c$ : 탱크 A, B와 방열기의 온도 [°C]

$K_1, K_2, K_3$ : 탱크 A, B와 방열기의 열전달계수 [J/m<sup>2</sup>-k-s]  
( $K_i$ 는 온도등 여러 요소의 함수이지만 상수로 가정함)

$q_t$ : 연결관의 순환류량 [m<sup>3</sup>/sec]

탱크 A, B간의 순환류  $q_t$  [m<sup>3</sup>/sec]는 두 탱크의 온도차에 따르는 자연 대류에 의해 지배되며, 이를 정확히 모형화하기는 쉽지 않다. 여기서의 주관심은 프로세스 모델이 설계조건외의 성질을 만족하는지에 있으므로, 단면적의 변동이 없는 관식 폐경로에 유체의 순환운동이 일어나고 있는 단순한 경우에 대해 베르누리 (Benoulli)식을 이용하면 다음 결과가 얻어진다. <부록>

$$q_t = K_4 \sqrt{T_a(t) - T_b(t)} \quad (2.5)$$

따라서 (2.5)를 (2.1)과 (2.3)에 대입하면, 설계된 프로세스 모델은  $T_a, T_b$ 에 대해 2차 비선형 미분 방정식으로 나타남을 알 수 있다.

본 모델에서 간단한 조작에 의해 몇가지 실험조건을 쉽게 만들 수 있다.

#### 1) 외란 ;

연속적인 외란은 주변온도  $T_b(t)$ , 냉각수 온도  $T_c(t)$ 와  $q_c$ 에 의해 인가되며, 돌발적이고 큰 외란은 각 탱크에 일시에 적당량의 찬물 또는 열음을 넣어서 얻을 수 있다. 또 선풍기등을 이용하여도 좋은 효과가 있다.

#### 2) 비선형성;

식 (2.1), (2.3), (2.5)에서 알 수 있는 바와 같이 순환 밸브를 조정하여  $q_t$ ,  $(T_a - T_b)$ 를 변화 시킴으로써 비선형성을 다르게 줄 수 있다. 이는 궁극적으로 동적특성의 변화를 의미한다.

#### 3) 지연시간;

연결관의 길이를 변경시키면 지연시간이 변하게 되며, 또한 순환률  $q_t$ 가  $(T_a - T_b)$ 의 함수이므로 순환 밸브의 조작에 의해서도 지연시간은 달라지게 된다.

#### 4) 동적 특성의 변경;

전열기의 출력을 입력으로 하고 탱크 B의 온도를 출력으로 하는 입출력 모델에 대해서는  $q_c, T_c, q_t$ 의 변화는 동특성 모델의 변경을 일으킨다. 탱크의 매질은 비열이 큰 물을 사용하면 대표적인 시정수 (dominant time constant)가 수초 - 수십초에 이른다. 비열이 작은 액체를 이용하면 좀더 빠른 동특성을 갖게 할 수 있다.

#### 5) MIMO 모델;

입력변수를  $u(t)$ 와 순환 밸브의 조작량으로 출력변수를  $T_a, T_b$ 로 하면 다변수 모델도 취급할 수 있다.

### 3. 온도 조절 시스템의 구성

<그림 1>의 열 프로세스를 제어대상으로 하여, 탱크 B의 온도를 출력변수로, 전열기 인가전압을 입력변수로하는 입출력 제어계를 구성하였다.

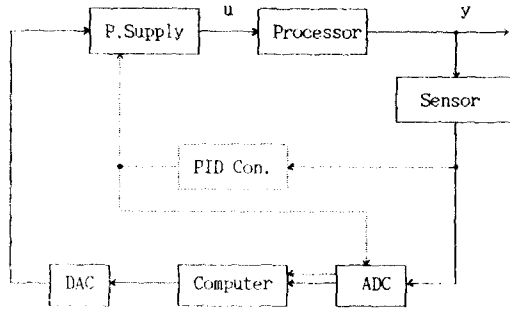


그림 3. 온도 조절 시스템  
Fig. 3. Temperature Control System

여기서 Power Supply는 PWM 직류 초핑(Chopping) 방식으로 최대 100 V - 2 KW 까지 조절가능토록 제작하였고, 온도 감지기는 RTD (Resistor Temperature Detector) type PT 100 Ω을 이용하였으며, PC-인터 페이스 카드 (Interfacing Card)는 12 bit A/D 16 채널(Channels), D/A 1 채널(Channels)을 사용하였다. PC-XT를 사용한 컴퓨터는 적응 제어기의 기능과 데이터 처리 (data logging) 기능을 수행한다.

### 4. 제어기의 성능실험 및 검토

<그림3>의 온도 조절 시스템에서 여러가지 실험 조건에 대해 적응 제어기와 PID 제어기의 성능 및 강인성 실험을 수행한 결과를 보이고자 한다.

적응 제어기는 주로 플랜트의 미지 시변 시간지연 문제를 고려한 Wellstad [1] 극지정형 자기 동조 제어기 (pole assignment self tuning controller : PASTC) 를 적용하였으며, 최소 분산형 자기동조 제어기[2]에 대해서도 몇가지 예를 실험하였다.

PID 제어기는 P,I,D 계수의 최적값 설정여부를 피하기위해 자동 동조 기능이 있는 제품 (일본 후지 전기, 모델 PYZ-5) 을 사용하였으며, 실험 조건은 적응 제어기의 예와 같게 하였다.

이 PID 제어기의 자동동조 방식은 리레이 제어를 이용한 임계이득 (ultimate gain)과 임계주기(ultimate period)를 결정하여 동조계수(tuning parameters)를 구하는 방식으로, P,I,D 동조계수를 계산하는 구체적인 설계기준은 명시되어 있지 않다.

일반적으로 널리 알려진 동조방식은 25 % 감쇠 특성을 갖도록 설계되는 Ziegler-Nichols 공식 [3,4]이 있다.

#### 4.1 지연시간을 고려한 PASTC 방식

본 실험에서 적용된 PASTC 알고리즘을 간단히 정리하고자 한다.

<그림 3>의 온도 조절 시스템에서 프로세스 모델을 다음식으로 표현하였다.

$$(q^{-1})y(t) = q^{-d_{max}} \bar{B}(q^{-1})u(t) + w(t) \quad (4.1)$$

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} \quad (4.2)$$

$$\bar{B}(q^{-1}) = \bar{b}_0 + \bar{b}_1 q^{-1} \quad (4.3)$$

$$(d_{max} \geq 1)$$

여기서,  $y(t)$ 는 열 프로세스의 탱크 B의 온도[°C]이고,  $u(t)$ 는 탱크 A에 취부된 전열기의 출력[W]이며,  $w(t)$ 는 확률 잡음이다.

그런데 플랜트와 모델간의 지연시간 불일치는 적응제어의 안정도에 매우 민감한 영향을 미친다.[1,5] 이러한 문제를 고려한 여러가지 적응제어 기법이 제시되었으며[6], 여기서는 Wellstead[1]등이 제시한 매개변수 확장방법을 적용하였다. 이 방식은  $B(q^{-1})$ 의 차수를 예상 최대 지연 시간  $d_{max}$  까지 확장시킴으로써 내재적으로 보상해 주는 것으로 적용이 간단하지만 실시간 추정해야할 매개변수 수가 그만큼 증가되어 지속 여기조건 만족에는 불리하다.

(4.3)을 다시 표현하면,

$$q^{-d_{max}} \bar{B}(q^{-1}) \triangleq B(q^{-1}) \quad (4.4)$$

$$B(q^{-1}) = b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2} + \dots + b_n q^{-n} \quad (4.5)$$

$$(n = d_{max} + 1)$$

따라서, (4.1)은

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) + w(t) \quad (4.6)$$

모델 (4.6)에 대해 지수하중 최소 자승 추정자 (exponential weighting least square estimator : EWLSE)를 사용하였으며, 망각인수 (forgetting factor)는 0.95 ~ 0.98 로 하였다.

극지정제어기를 다음 식으로 놓으면,

$$R(q^{-1})u(t) = -S(q^{-1})y(t) + H(q^{-1})r(t) \quad (4.7)$$

Diophantine 식은 (이하 다항식의 연산자 표기는 생략한다.)

$$\hat{A}R + \hat{B}S = T$$

여기서  $r(t)$ 는 기준입력, “ $\hat{\cdot}$ ” 는 추정치,  $T(q^{-1})$ 는

원하는 페루프 특성다항식이다.

$H(q^{-1})$ 는 기준입력의 Pre-filter 로서 보통 페루프계의 정상상태 이득을 1 이 되도록 결정한다.

#### 4.2 실험 결과

##### (1) PASTC 적용 결과

몇번의 스텝응답으로 부터 샘플링 시간과 초기 기동정책을 정하였다. 이 실험에서 공통조건을 정리하면 다음과 같다.

샘플링 시간	: $T_0 = 20$ [sec]
탱크 B의 초기온도	: $35 - 38$ [ °C]
기준 온도	: $50$ [ °C]
EWLSE. 망각인수	: $\lambda = 0.98$
최대 예상 지연시간 인수	: $d_{max} = 4$
최대 입력 $U_{max}$	: $1.2$ [ Kw]

계수추정만 수행하는 초기 기동구간은 20 스텝(step)이며 이때 인가된 입력은 800 [w] 이다. 21 스텝부터 피이드 백 제어 루프 (feedback controlled loop)가 동작되도록 하였다.

PASTC 방식의 성능 평가를 위한 몇가지 실험조건과 그 결과는 아래와 같다.

.실험 PA1 :돌발적인 부하성 외란의 인가로서 정상상태인 150 스텝에서 탱크 B (물용량 = 0.8 L)에 얼음 250 g ( 0.2 L)을 일시에 투입 하였다. 이때 그림 1 의 순환 밸브  $V_1$ 은 1/2 닫힌 상태이고, 냉각수의 순환률은 0.1 [l/sec]였다. < 그림 4.a >는 실험한 입출력 결과이며 < 그림 4.b >는 매개변수 추정상태를 나타낸다.

.실험 PA2 :정상상태인 155스텝에서 순환 밸브  $V_1$ 을 1/3 닫힌 상태에서 2/3 닫힌 상태로 변경 시킴으로써 지연 시간과 비선형성이 달라져 다이내믹스 (dynamics)의 변화를 일으킨 경우이다. < 그림 5 >는 이 결과를 보여준다.

.실험 PA3 :기준 입력 50 [°C] 를 100 스텝에서 55 [°C]로 스텝 변화시킨 경우로 , 이때 주변대기 온도는 29 [°C] 냉각수 온도는 24 [°C]였다. < 그림 6 >은 이 결과를 보여준다.

##### (2) PID 제어기 적용 결과.

앞에서 언급한 온도조절기 (후지전기 , 모델 PYZ -5 )는 조절 출력으로 DC. 4 - 20 mA를 내는 것으로 저항을 통해 파워 어 씨플라이 (power supply)의 제어 입력으로 연결하였다.

자동 동조 기능에 의해 50 [°C]기준치에 대해 구한 PID 동조치는 다음과 같다.

비례계수	: $K_P = 40.6$
------	----------------

적분 동작 계수 :  $K_I = 515$

미분 동작 계수 :  $K_D = 84$

PID제어는 적응제어기의 실험때와 달리 연속제어제가 된다. 이때 각 실험의 입출력 데이터는 매초마다 컴퓨터에 저장되도록 하였다. 적응 제어기와 비교하기 위한 실험조건은 다음과 같다.

.실험 PID1 :실험 조건은 <PA1>과 같으며 (단, 주변대기 온도 29[°C]), <그림 7>은 이 결과를 보여준다.

.실험 PID2 :<그림 8 >는 50[°C]에서 튜닝(Tuning)한 상기 PID 제어기로 기준입력을 55[°C]로 준 경우의 결과이다. (이때의 외기온도는 28[°C]였다.)

.실험 PID3 :<그림 9>은 PID1과 같은 조건에서, 기준입력을 2000[sec](100 step에 해당)에서 50[°C]로부터 55[°C]로 변경시킨 경우의 결과이다.

#### 4.3 검토

PASTC 적용 실험 결과는 세경우 모두 비교적 긴 샘플링 시간 (sampling time)에도 불구하고 뛰어난 제어 성능을 보이고 있다. 그런데 <그림 4.b>에서 보이는 바와 같이 계수 추 정면에서 보면 약간의 유동(drift)현상이 나타나는데 이것은 이러한 적응제어 방식을 장시간 운용시 주의 깊게 고려되어야 함을 의미한다. 이현상이 모형화 오차나 비선형성 또는 오프셋(off set)의 영향 중 어떤 요인에 의한 것인지 는 추정하기 쉽지않다.

PID제어기의 적용결과도 정밀도는 다소 떨어지나 비교적 사용 가능한 결과를 보이고 있다. 그러나 50°C에서 튜닝 (tuning)된 PID계수로 55°C기준치를 추종하도록 한 실험 PID2 <그림 8>의 결과와 정상상태에서 기준입력이 50°C에서 55°C로 변화 시킨 <그림 9 >의 예에서 현저한 제어 성능의 악화를 볼 수 있으며 이것은 열 프로세스(process)의 비선형성에 기인한 것으로 생각된다. 특히 탱크(tank)벽이 철판으로 되어 있기 때문에 실험시의 대기온도에도 적지않은 영향을 받는 것으로 나타났다.

PASTC와 PID실험에서 모든 각경우의 제어성능에 차이가 나지만 본 실험에서 사용한 PID 제어계수 결정방식이 가장 잘 설정된 것이라고 보장할 수 없으므로 상대적인 비교는 큰 의미가 없다고 생각된다.

이 외에도 <그림 1 >의 열 프로세스는 2.3절에서 정의한 바와 같이 다양한 실험조건외의 구성이 용이하므로, 제안되는 제어기의 성능 시뮬레이션에 매우 효과적인 것으로 기대된다.

#### 5. 결 론

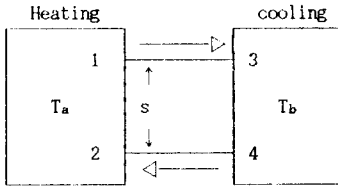
본 논문에서는 적응제어 방식의 성능 평가 및 강인성을 여러가지 조건에서 실험적으로 시뮬레이션해 볼 수 있는 온도 조절 시스템의 구성에 관해 기술하였다.

적응제어에서 최근의 주요관심은 외란, 모델의 불확실성, 비선형성, 미지 시변 지연시간등에 대해 강인성을 개선시키는데 있다. 이때 개선효과의 입증은 많은 경우 컴퓨터 시뮬레이션

에 의존하고 있지만 실질적인 상황을 복합적으로 고려하는 데는 한계가 있다. 우리는 제어성능과 안정성에 영향을 주는 이들 여러 조건들을 다양하고 용이하게 변화시킬 수 있는 실험실용 열 프로세스를 설계, 제작 하였다.

또한, PC-XT, 2 [KW]용량의 파워어 씨플라이(power supply)와 AD / DA 인터페이스 카드 (interfacing card) 등으로 하나의 온도 조절 시스템을 구성하고 극지정 적응제어기와 PID 제어방식에 대해 평가를 수행한 몇가지 예를 보였다. 이 시스템을 비 적응 제어계의 유사한 목적에도 매우 효과적으로 활용될 것 이라고 생각된다.

### (부 록) 식 (2.5)의 유도



< 그림 A.1 >

그림 1의 열프로세스에서 대류에 의한 순환계는 < 그림 A.1 >과 같다. 각 탱크에서의 밀도를 평균치로 놓고 베르누리(Bernoulli)식을 적용하면

$$P_1 - P_2 = \rho_a g h + \frac{1}{2} \rho_a (u_2^2 - u_1^2) + \Delta P_1 \quad (A.1)$$

여기서 우변 2번째항은 전체 압력 강하에 미치는 영향이 1% 미만이므로 무시하고 전 순환구간에 대해 식을 세우면

$$\begin{aligned} P_1 - P_2 &= \rho_a g h + \Delta P_1 \\ P_2 - P_3 &= \Delta P_2 \\ P_3 - P_4 &= -\rho_b g h + \Delta P_3 \\ P_4 - P_1 &= \Delta P_4 \end{aligned} \quad (A.2)$$

여기서  $\Delta P_1$ 는 관역 마찰, 엘보 등에 의한 압력강하이다. (A.2)의 네식을 모두 합치면

$$(\rho_a - \rho_b) g h + \Delta P_f = 0 \quad (A.3)$$

$$\text{여기서 } \Delta P_4 = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4 \quad (A.4)$$

$$\text{그런데 } \Delta P_f = \begin{cases} \frac{2f\rho u^2}{d} & (\text{관의 경우}) \\ \frac{1}{2} \epsilon v \rho u^2 & (\text{엘보의 경우}) \end{cases}$$

다시 쓰면

$$\Delta P_f = f(u^2) \approx C_1 u^2 \quad (C \text{는 상수}) \quad (A.6)$$

(A.6)을 (A.3)에 대입하면

$$(\rho_a - \rho_b) g h + C_1 u^2 = 0 \quad (A.7)$$

대류(convection)에서 온도와 밀도의 관계식은

$$(\rho_a - \rho_b) = \beta \rho_b (T_b - T_a) \quad (A.8)$$

$$\beta = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \quad \text{Volume coefficient of expansion}$$

(A.7), (A.8) 로 부터

$$u^2 = \frac{\beta \rho_b g h}{C_1} (T_a - T_b) \quad (A.9)$$

그런데 순환관의 유량  $q = u A$  (A는 관의 단면적) 이므로

$$\begin{aligned} \therefore A &= \sqrt{\left( \frac{\beta \rho_b g h}{C_1} \right) (T_a - T_b)} \\ &\propto \sqrt{T_a - T_b} \end{aligned} \quad (A.10)$$



### 참고 문헌

1. P.E.Wellstead et al.2 "Pole Assignment Self Tuning Regulators." Proc.IEE, Vol.126, No.8, pp781-787, 1979
2. G.C.Goodwin and K.S.Sin, Adaptive Filtering Prediction, and Control, Prentice - Wall, 1984.
3. J.G.Ziegler and N.B.Nichols, "Optimum Settings for Automatic Controllers," Trans.ASME, Vol.64, pp.759-768, 1942
4. C.A.Smith and A.B.Corripio, Principles and Practices of Automatic Process Control, John Wiley & sons, 1985
5. H.Kurz and W.goedecke, "Digital Parameter Adaptive Control of Process with Unknown Dead Time", Automatica, Vol.17, No.1, pp. 245 -252, 1981.
6. H.S. Yang, Y.C. Kim and K.H.Kim, "Adaptive Control of Discrete Time Invariant Process Having Variable Time Delay", Proc. 24th Annual Allerton Conf. on pp.645-651, 1986

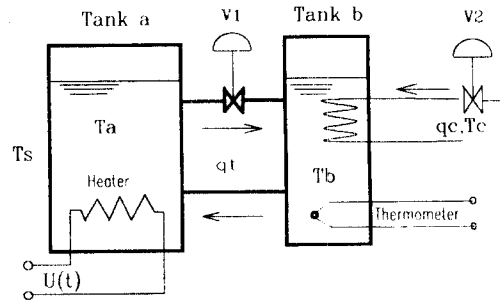


그림 1. 열 프로세스 모식도  
Fig. 1. Schematic diagram of thermal process

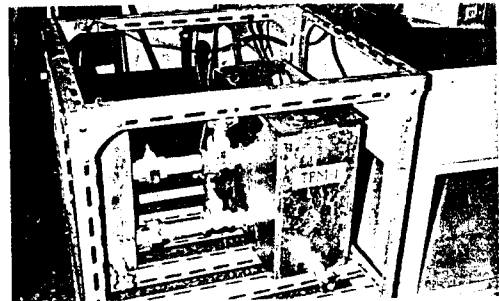


그림 2. 열 프로세스 사진  
Fig. 2. Photograph of thermal process

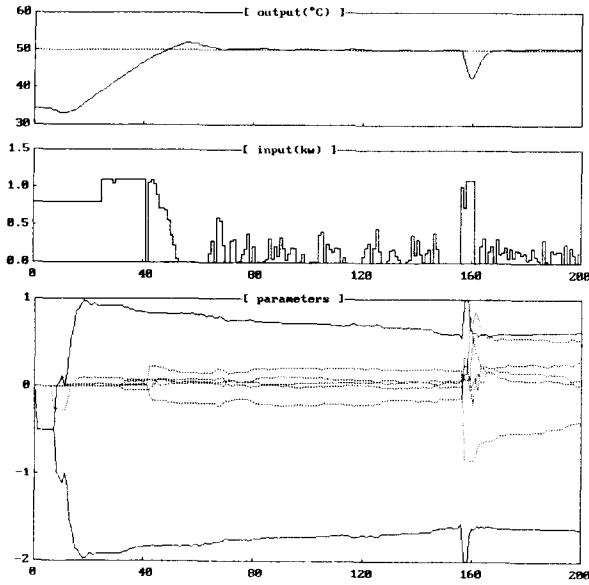


그림 4. (a) 실험 PA1의 결과 (150 스텝에서 돌발 외란)  
 (b) 계수 추정치  
 Fig. 4. (a) Result of Experiment PA1 (abrupt disturbance at step 150)  
 (b) parameter estimates

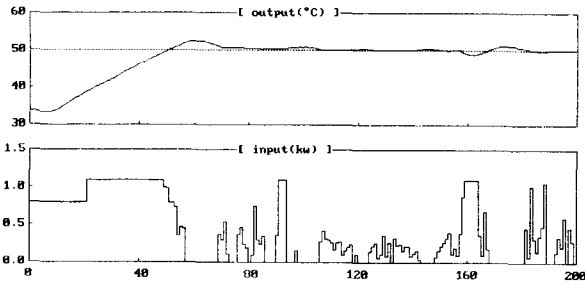


그림 5. 실험 PA2의 결과 (155 스텝에서 동특성 변경)  
 Fig. 5. Result of Ex. PA2 (dynamics change at step 155)

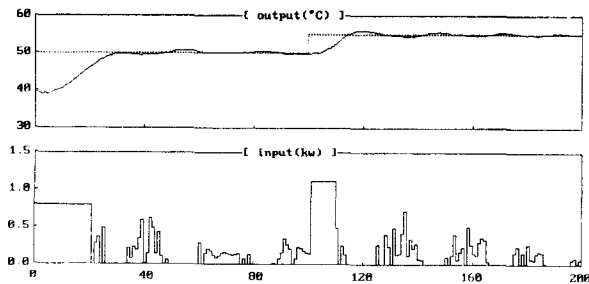


그림 6. 실험 PA3의 결과 (100 스텝에서 기준입력 변경)  
 Fig. 6. Result of Ex. PA3 (reference change at step 100)

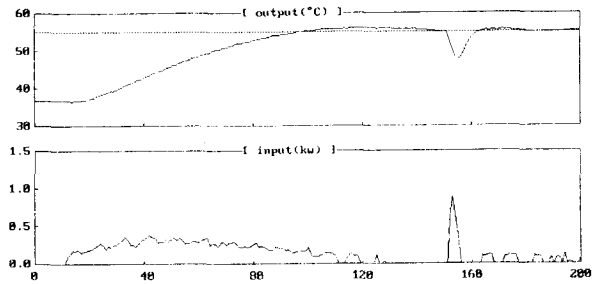


그림 7. 실험 PID1의 결과 (Ex. PA1과 동일조건) ( $20^{\circ}\text{C}/\text{step}$ )  
 Fig. 7. Result of Ex. PID1 (same conditions as Ex. PA1)

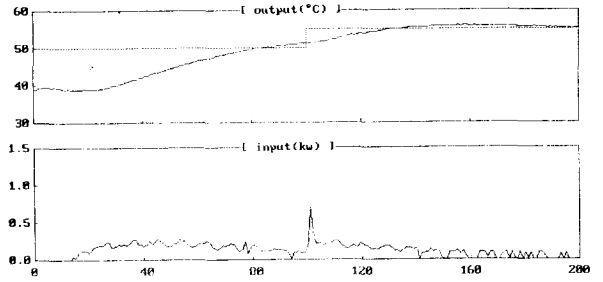


그림 8. 실험 PID2의 결과  
 Fig. 8. Result of Ex. PID2

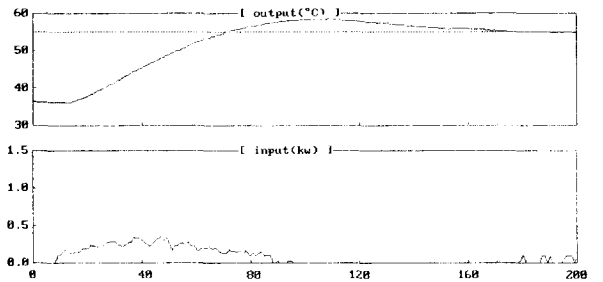


그림 9. 실험 PID3의 결과  
 Fig. 9. Result of Ex. PID3



그림 10. 열 프로세스 제어 시스템  
 Fig. 10. Thermal process control system