

마이크로컴퓨터를 이용한 多變數 시스템의 適應制御에 관한 연구 (Adaptive Control of a Multivariable System Using μ -Computer)

金 永 基* 卞 增 男**

(Kim, Young-Key and Bien, Zeungnam)

要 約

典型的인 多變數 化工程시스템을 실제로 구성하고 이 시스템에 대해 종래에 쓰이던 하드웨어 制御器 대신에 마이크로컴퓨터를 써서 制御한 실험연구의 결과를 보고하였다. 특히 시스템에 공급되는 流量의 水壓이 降下함으로 인한 시스템 特性的 변화에 대해서 流量計를 이용한 適應制御를 시도하여 그 制御性能이 크게 개선되도록 하였다.

Abstract

It is reported that a typical multivariable system of chemical process type was constructed and control experiment was conducted using a μ -computer instead of using conventional hardware controller.

When the pressure of water to be supplied to the multivariable system is varying, an adaptive control method using a flowmeter is suggested to enhance the control performance.

1. 序 論

지난 이십여년 간에 발생된 여러 工業分野의 發展을 제 2의 産業혁명이라 부를 정도로 높이 평가하는 견해가 많다. 이 중에서도 가장 두드러진 役割을 하고 있는 것은 디지털 컴퓨터와 이의 응용분야이다. 특히 생산공정을 自動적으로 制御함에 있어서, 종래의 애널로그 機器와 릴레이등을 사용한 제어장치가 디지털 컴퓨터를 이용한 디지털 制御器로 대체되고 있어 制御方式의 융통성을 통한 생산성 향상에 크게 기여하고 있다.

디지털 컴퓨터의 프로세서 제어에서의 役割을 대분하여 (i) 被制御量의 시간에 對한 함수관계를 記錄하는 役割 측 데이터 로깅(data logging)과 또는 경제적

이윤을 最大化하기 위한 最適操業策을 결정하고 이를 수행하기 위한 셀·포인트의 결정과 被制御量을 해석하는 등의 監督의 制御(supervisory control)가 있고, 이들은 일종의 間接的 役割이라 볼 수 있으며, (ii) 컴퓨터가 프로세서의 閉回路제어를 위한 한 部分시스템이 되어 셀·포인트나 被制御변수 또는 다른 측정치로부터 제어함수를 계산·발생하고 이를 써서 프로세서를 직접 제어하는 直接的 디지털 制御(Direct digital control) 役割로 나눌 수 있다. 本 論文에서는, 특히 마이크로프로세서를 이용한 直接的 디지털 制御方式을 化工程시스템에 적용할 때의 문제點 및 해결책을 연구하기 위하여 간단한 二人力二出力의 構造物을 제작하고 마이크로컴퓨터를 제어장치로 하여 실험한 결과를 수록하였다.

프로세서의 制御時, 在來式 PID方式이나 線型모형을 사용한 제어방식이 非效果的인 경우가 있는데, 그것은 플랜트의 非線型的 特性이 強하거나 시스템의 특

* 正會員, 慶北大學校 電子科
** 正會員, 韓國科學院 電氣 및 電子科 副教授
(Dept. of Electrical Science KAIS)
接受日字; 1979年 9月 26日

작이 시간이 경과함에 따라 현저하게 변화할 때에發生한다. 이 때에는 소위 適應制御(Adaptive control) 테크닉을 택하여 콘트롤시스템의 性能을 改善해야 한다. 본 논문에서 다루는 시스템은 두 개의 입력으로서 溫水와 冷水의 제어밸브를 조정하여 容器에 모이는 물의 溫度와 水位를 제어하도록 구성된 것으로, 제어중에 시스템의 動的特性(dynamics)이 水壓의 變動으로 變하였을 때에는 適應制御方式을 사용하여 改善된 反應을 얻도록 하였다.

시스템制御용 컴퓨터로는 Z-80 μ -processor를 CPU로 하는 Cromemco 회사의 Single card computer와 16K byte의 RAM을 사용하여 구성하였는 바, Machine cycle이 4 MHz로서, 예컨대 Im sai 8080과 같은 시스템에 비하여 두 배의 계산속도를 갖고 또 시스템제어를 목적으로 하여 개발된 3K-control basic 프로그램을 내장하므로 효과적으로 여러 가지 제어 알고리즘을 시도할 수 있었다.

本 論文의 構成은 다음과 같다. 먼저 제2장에서 제어시스템의 構造와 制御目的 및 이에 따른 制御問題를 記述, 定義하였고 제3절에서는 효과적 제어를 위한 필수 단계인 시스템모델링 및 파라미터의 決定(identification)을 行하였다. 제4절에서는 제어실험의 결과

들을 기록하고 논의(論議)하였으며 마지막으로 본 실험연구의 결과를 정리하였다.

2. 시스템의 構造와 制御의 目標

一般的으로 化工程에서 많이 다루는 制御量 중에 溶液의 濃縮度, 溫度 및 液面의 높이 등이 있다. 本論文은 溫度와 液面의 높이를 被制御變數(Control Variables)로 하는 典型的인 한 化工程시스템을 그림 1과 같이 構成하였다. 이 시스템에서 보듯이 상수도에서 공급되는 물이 두 갈래로 갈라져서 하나는 그대로 冷水가 되고, 하나는 整溫槽를 통과하면서 溫水가 되며 각각의 流量들의 크기는 두 개의 밸브들에 의해 制御된다. 본 多變數 시스템에서 被制御量(Control variable)을 測定하기 위하여 水位 檢出器와 써모커플(thermocouple)을 이용하였고, 그 量들은 A/D 변환장치를 거쳐 디지털 컴퓨터에 들어간다. 컴퓨터는 이 값을 읽은 후 알고리즘에 의하여 電流-空氣壓變換器(current to pneumatic converter)를 통하여 밸브 制御器에 動作信號를 내보내어서 밸브들의 開閉 정도를 조정하여 필요한 操作量을 얻는다. 多變數 시스템에 실제로 공급되는 液入流量을 알기 위해 디지털식 流量計器를 제작 부착하였으며 이 計器에서 얻어진 실

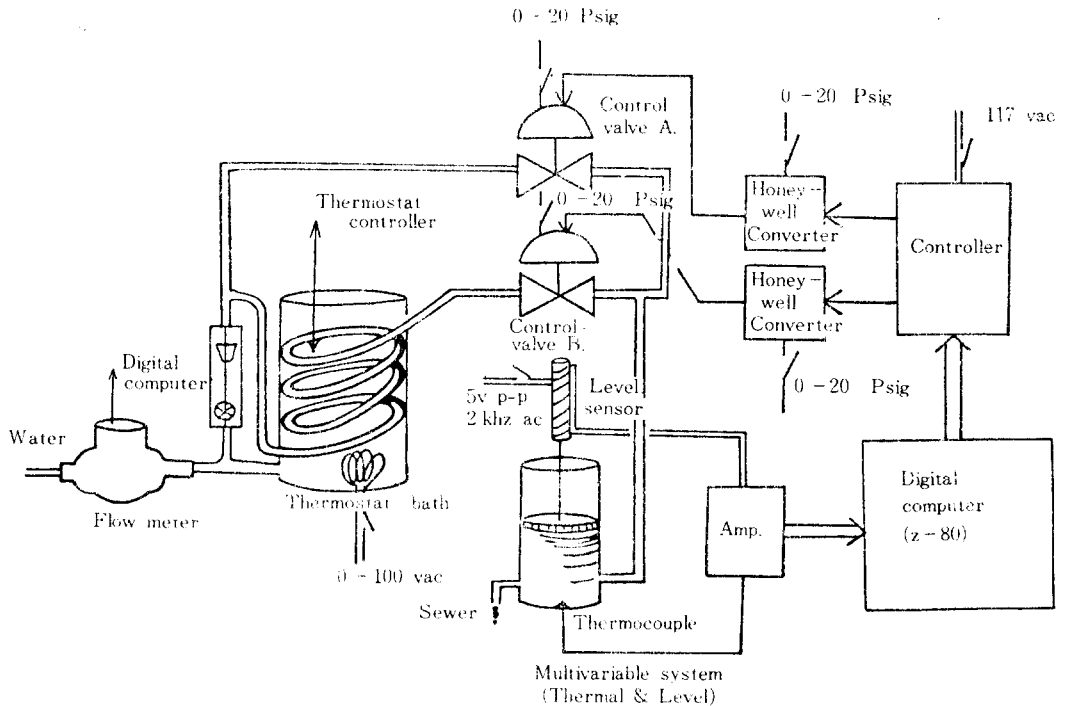


그림 1-a. 全體 制御系의 構造

Fig. 1-a. The structure of the whole assemblage of the control system.

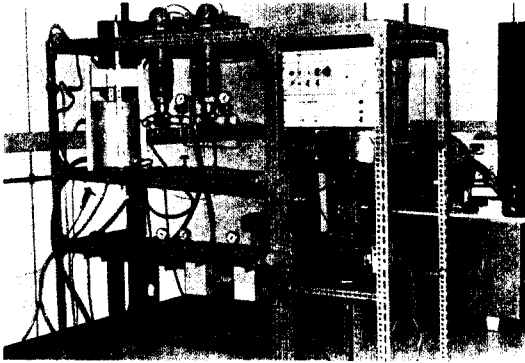


그림 1-b. 全體 制御系의 실제의 모양
 上左에서: 整溫槽, 2개의 制御用 밸브
 下左에서: 공기필터, 整壓器, 공기필터, 2개의 壓力變換器(전류를 氣壓으로 變換)
 右에서: 制御판넬, 制御 및 增幅回路, 發振器

Fig. 1-b. Actual construction of the control system.

제의 液入流量의 情報도 컴퓨터로 읽어 들이도록 하여 適應制御方式을 具現하는데 이용하였다.

本 論文에서는 以上에서 기술된 실제의 시스템에 대해서 지금까지 쓰이던 하드웨어로 구성된 아날로그 制御장치를 마이크로프로세서를 이용한 디지털 制御方式으로 대체하여 피드백制御를 행하는데 발생하는 문제점을 파악하고 이를 해결하는 것을 제 1 목적으로 하였다. 본 시스템은 특히 때때로 제어性能이 크게 떨어지는 경우가 발생하는데 그것은 시스템이 外部의 교란을 받아서 그 動的 特性이 달라지기 때문이다. 그림 1과 같은 시스템에서 공급원인 물의 水壓은 사용량이 적은 夜間에 비해서 물을 많이 쓰는 주간에 크게 떨어진다. 이것은 本 多變數시스템의 特性을 변화시키는 直接的인 요인이 된다. 따라서 水壓의 변화가 초래하는 制御上의 어려움을 극복하는 방법을 찾고 이를 실험을 통하여 확인하는 것을 제 2 목적으로 하였다.

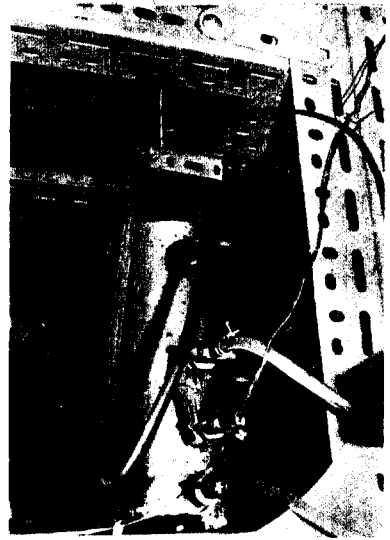
3. 시스템 모델링과 파라미터의 決定

3-1. 시스템 모델링(System Modelling)

그림 2에서 液入流量을 $\omega_i(t)$, 液出流量을 $W_0(t)$, 容器的 밀면적을 A , 液面높이를 $h(t)$, 液入液溫度를 $\theta_i(t)$, 그리고 液出液溫度는 $\theta(t)$ 라고 하자. 여기서 容器 内에서는 물이 잘 섞여서 溫度가 일정하며 容器 壁面을 통하여 소모되는 熱量이 전혀 없다고 假定한다.

짧은시간 Δt 内에 容器 内의 변화한 流量은 물이 들어온 量과 나간 量의 차이와 같다. 즉,

$$A \Delta h = W_i \Delta t - W_0 \Delta t \quad (1)$$



(a) 시스템 實物圖

(b) 시스템 스킷치

그림 2. 多變數 制御對象

Fig. 2. Multivariable controlled process.

여기서 Δh 는 시간 Δt 에서 변화한 水位를 말한다. 本 論文에서 사용된 시스템 하드웨어를 보면 液出되는 관(pipe)의 굵기는 직경 1/4 인치이고 길이는 2m 이므로 laminar flow를 하게 된다. 이 때는 Hagan-Poiseville의 法則이 적용되며 그 관계식은,

$$W_0(t) = \alpha \cdot h(t)$$

여기서 α 는 비례상수이다. 이 관계식(1)식에 대입하면 다음과 같은 관계식을 얻는다.

$$A \frac{\Delta h}{\Delta t} = \omega_i - \alpha \cdot h \quad (2)$$

따라서 Δt 가 매우 작을 때 (2)식은

$$A \frac{dh}{dt} = -\alpha \cdot h + \omega_i \quad (3)$$

가 된다. 이 (3)식은 波制御量중의 하나인 液面높이에 대한 모델이 되며, 이 식으로 記述되는 서브시스템을 편의상 準液面系(level subsystem)라고 부르기로 한다.

다른 波制御量인 물의 溫度에 관한 관계식을 세우기 위하여 물의 Specific Heat Capacity를 C_p 라고 하고 그 값이 일정하다고 가정한다. 容器 內의 기존의 熱에너지는 入力되는 熱에너지와 出力되는 熱에너지의 차이와 같다. 즉,

$$C_p \omega_i \theta_i(t-Z)\Delta t + C_p Ah\theta - C_p W_0 \theta(t) = [\theta(t) + \Delta\theta] \cdot [C_p Ah + C_p (W_i - W_0)\Delta t] \quad (4)$$

여기서 $Z > 0$ 는 時間遲延을 표시하는 양으로 용기에 人力되는 용액이 容器 內에 平準하게 확산되어 온도 入力효과를 發生하는데 걸리는 平均時間으로 해석할 수 있다. 이 時間遲延 효과는 Agitator를 이용하는 등의 기계적인 방법이나 용기의 부피를 줄임으로 작게 할 수 있을 것으로 생각된다.

(4)식을 전개하고 $\Delta\theta/\Delta t$ 항은 그 값이 매우 작으므로 무시하면

$$Ah \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \cong -\theta(t)W_i + \theta_i(t-Z)\omega_i \quad (5)$$

따라서 $\Delta t \rightarrow 0$ 의 극한에서 (5)식은,

$$Ah(t) \frac{d\theta(t)}{dt} = -\theta(t)\omega_i(t) + \omega_i(t)\theta_i(t-Z) \quad (6)$$

(6)식은 制御量인 容器 內의 溫度에 관한 모델이며 이것을 편의상 準熱系(Temperature Subsystem)라고 부르기로 한다. 물론 (3)식과 (6)식의 표현에서 나타나듯이 制御變數 ω_i 및 被制御變數 h , 에 의해 서로 링크되어 있음이 주목되어야 한다.

본 시스템에서는 상수도의 水壓이 一定한 경우, 人力液量 $\omega_i(t)$ 는 두 valve의 열림정도에 비례하고 人力溫度 $\theta_i(t)$ 역시 두 valve의 상대적인 열림정도에 의하여 결정된다. 따라서 電流-空氣壓變換器(Current to pneumatic converter)를 통하여 컴퓨터에 의하여 조작되는 두 Valve A, B에 인가되는 전압을 각각 V_A 및 V_B 라 하면 Valve의 時定數(Time constant)가 프로세스의 시정수에 비해 매우 작아 다음과 같은 선형 관계식으로 표시된다.

$$\theta_i(t) = k_{11}V_A(t) + k_{12}V_B(t) \quad (7)$$

$$\omega_i(t) = k_{21}V_A(t) + k_{22}V_B(t) \quad (8)$$

그러나 식(7)~(8)과 같은 선형관계식은 컴퓨터 제어시 쉽게 처리되므로, 간결하도록 표현하기 위하여 본 논문에서는 이들 식을 사용하지 않기로 한다.

3-2. 파라미터의 決定

多變數시스템을 identification 하기 위해 많이 사용

되는 階段人力(Step Input)의 應答을 보고 檢討하는 方法을 取하였다. 계단입력에 대한 準液面系의 應答曲線을 그림(3)과 같이 얻었고, 이를 이용하여 최소자승법을 이용하여 구한 시스템 動的特性式은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{dh(t)}{dt} = -0.016h(t) + 0.013\omega_i(t) \quad (9)$$

準熱系에 대한 檢證은 時間遲延(Time-delay)를 알기 위하여 W_i 를 일정하게 유지하고 $h(t)$ 가 定常狀態의 값이 되도록 하여 $\frac{\omega_i}{Ah}$ 항이 상수로 취급된 상태에서 스텝입력에 대한 본 시스템의 응답곡선은 그림 4와 같은 형태로 얻었고, 이 곡선에 對한 最善의 관

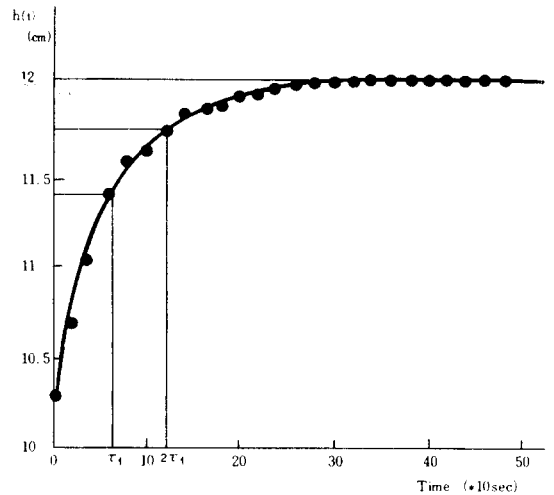


그림 3. 準液面系의 階段應答曲線($\omega_i(t) = 15.2 \text{ cm}^3/\text{sec}$)
Fig. 3. The step input response curve of level subsystem. ($\omega_i(t) = 15.2 \text{ cm}^3/\text{sec}$)

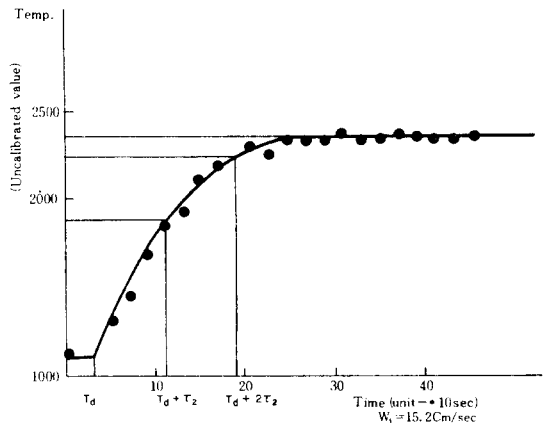


그림 4. 準熱系의 階段應答曲線
Fig. 4. The step input response curve of thermal subsystem.

계식으로서 다음과 같은 식을 유도하였다.

$$\frac{d\theta}{dt} = -0.014\theta + 0.014\theta_i(t-30) \quad (10)$$

$$(\omega_i = 15.2 \text{ cm/sec})$$

(10)식에서 보는 바와 같이 準熱系는 30초의 時間遲延 현상을 갖는 것으로 볼 수 있다.

그림 4의 응답곡선으로부터 高次元의 전달 함수를 써서 모델링할 수도 있으나 (10)식과 같이 Time-delay를 이용하는 것이 상례이다.^[3]

4. 制御方式과 실험

4-1. 制御方式

본 시스템을 실제로 제어하여 安定된 방법으로 주어진 setpoint 변화에 응하도록 하는 데는 세 가지 어려움이 있었다. 첫째는 시스템이 非線型이라는 것, 둘째는 제어변수에 시간지연이 있다는 것, 그리고 세째는 水壓이 때때로 바뀌어 시스템의 動力學가 변동되므로 단순한 피드백제어를 사용하면 반응성능이 나쁘다는 점 등이다. 따라서 선형多變數시스템의 제어에서와 같이 간단히 制御이론을 적용하기가 곤란하다. 本 論文에서 다루는 시스템은 準液面系 <식(3)>가 온도변수에 무관함을 관찰하고 또 다음과 같은 관계가 있음이 고려되었다. 즉 (3)식의 양변에 變數 $\theta(t)$ 를 곱하면

$$A\theta(t) \frac{dh(t)}{dt} = -K_h h(t)\theta(t) + \omega_i(t)\theta(t) \quad (11)$$

(11)식을 (6)식에 더하면

$$A \left(h \frac{d\theta}{dt} + \theta \frac{dh}{dt} \right) = -K_h \theta + \theta_i(t-Z) \omega_i \quad (12)$$

그러면 만약 새 변수 x, u 를 정의하여

$$x(t) \triangleq h(t)\theta(t)$$

$$u(t) \triangleq \theta_i(t-Z) \omega_i(t)$$

로 하면 (12)식은

$$A \frac{dx}{dt} = -Kx + u(t) \quad (13)$$

즉, 상태벡터 x 와 제어벡터 u 를 갖는 시스템 (식 (13))은 동적특성식의 형태가 準液面系와 같다. 따라서 정상상태에 있는 주어진 시스템의 setpoint (h, θ)를 다른 값(h^*, θ^*)으로 변동하기 위하여 다음과 같은 방식으로 制御하도록 하였다.

- (i) 準液面系는 獨自의으로 $h(\infty) = h^*$ 에 도달하도록 ω_i 를 인가하고
 - (ii) 準熱系는 ω_i 와 h 가 정상상태에 있을때 값을가 정하고 같은 다이내믹인 (13)식을 이용하여 Time-delay가 제어변수에 있는 시스템으로 간주하고 제어한다.
 - (iii) 만약 수압에 변동이 생기어 dynamics가 달라지면 시스템의 이득을 조정하여 적응제어 한다.
- 여기서 관찰할 것은 時間遲延현상이 있는 시스템(식 (10))에 종래의 피드백 루우프를 그대로 형성하여 制御하고자 한다면 피드백 制御器는 단지 현재 입수된 자연된 상태와 기준치와의 오차에 대해서만 수정하는 방향으로 動作信號를 결정하므로 많은 경우 발전현상이 생겨서 그 性能이 크게 떨어지게 된다. 이것을 해결하기 위해 Smith는 人力 및 出力信號를 기초로 遲延時間 이후의 상태를 豫測한 후 그것에 動作信號를 수정하는 線型豫測制御器를 고안하여 피드백 루우프 內에 遲延要素가 없어진 것과 같은 결과가 되도록 하였다.^[3] 본 실험에서도 이 Smith 예측기를 구성하여 制御한 결과 만족할만한 결과를 얻을 수 있었다.

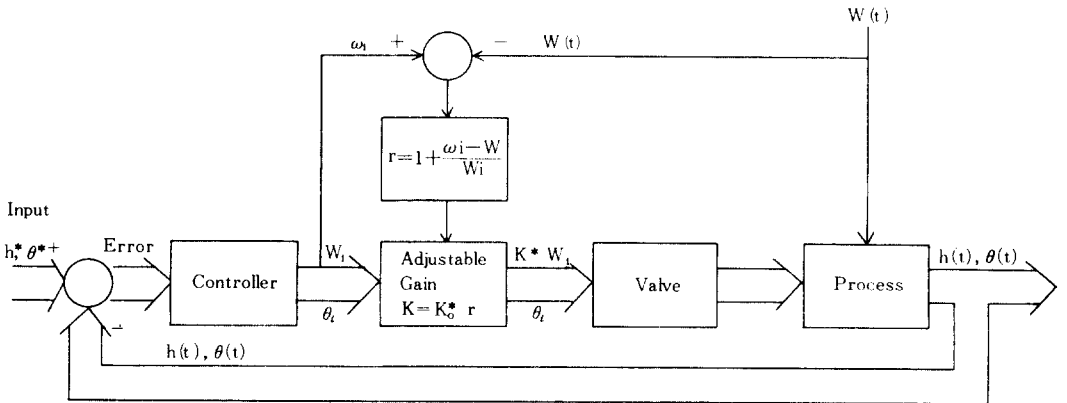


그림 5. 適應制御시스템의 構成
Fig. 5. Adaptive control system.

그리고 본 실험에서 시스템의 특성을 변화시키는 수압의 降下에 대해서 適應制御시스템을 그림 5와 같이 구성하여 制御性能을 개선하도록 시도하였다. 즉 원하는 液入流量 $\omega_i(t)$ 와 수압변동으로 인하여 변동된 실제로 시스템에 들어가는 流量 $W(t)$ 를 외부의 流量計를 이용하여 測定한 후 그 차이의 비율만큼 制御器의 利得을 높여서 制御하도록 할 것이다.

4-2. 實驗結果

整溫槽의 온도를 75°C로 하고 制御 밸브에 공급하는 氣壓을 1.5기압으로 하고 CRT를 통하여 制御量인 水溫과 水面의 높이에 대하여 目標値를 keyboard를 통하여 입력시키어 상기한 제어방법으로 시스템을 구동하였는 바, 잘 動作함을 보았다. 그 다음으로 水壓이 定常狀態보다 낮아져서 80%가 되었을 때 適應制御를 시도하여 단순히 피이드백 制御한 경우와 그 성능을 그림 6과, 그림 7에서 그 결과를 보았다. 좀

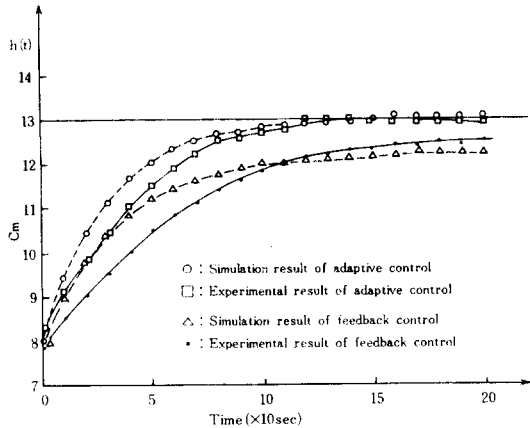
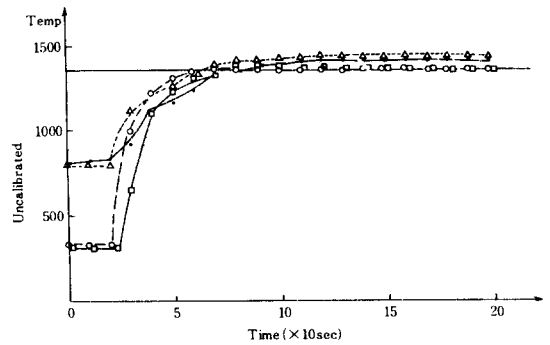


그림 6. 多變數시스템을 適應하여 準液面系에 나타난 結果

Fig. 6. The control results in level subsystem.

더 구체적으로 설명하기 위해서 먼저, 目標値의 95%에 도달하는 時間을 $T_{0.95}$ 로 표시하기로 한다. 이 때 準液面系에 대하여 適應制御한 경우 $T_{0.95} = 90$ 초, 피이드백 制御인 경우 $T_{0.95} \geq 250$ 초인 것으로 適應制御方式으로 그 성능이 크게 改善된 것을 보여 준다. 시뮬레이션과 實驗結果를 비교하면, 適應制御인 경우는 그 應答速度가 조금 느리지만 거의 일치함을 볼 수 있다. 피이드백 制御인 경우 시뮬레이션 結果는 目標値에 도달할 수 없는 것으로 나타나지만 實驗結果는 느리게 점점 目標値에 접근함을 보여준다. 이것은 人力流量 $\omega_i(t)$ 가 작은 범위에서는 밸브 特性이 水壓에 영향을 적게 받기 때문인 것으로 믿어진다.

準熱系에 있어서도 適應制御인 경우 $T_{0.95} = 37$ 초



- : Simulation result of adaptive control
- : Experimental result of adaptive control
- △ : Simulation result of feedback control
- : Experimental result of feedback control

그림 7. 多變數시스템을 制御하여 準熱系에 나타난 結果

Fig. 7. The control result in thermal subsystem.

이고 피이드백 制御인 경우 $T_{0.95} = 50$ 초로서 그 성능이 適應制御方式에 더 좋다는 것을 볼 수 있다.

溫度의 값은 실제의 섭씨온도가 아니며 A/D Converter의 값으로 표기 하였다. 溫度의 目標値가 1350이며 適應制御인 때는 이 값에 도달하고 있으나 피이드백 制御인 경우 1400이 되는 것을 본다.

이것은 디지털 制御器에서 制御變數 $x(t)$ 를 $x(t) = h(t) \cdot \theta(t)$ 로 定義하였기 때문에 $h(t)$ 가 아직 目標値에 이르지 못하였으므로 대신 $\theta(t)$ 가 커졌기 때문인 것으로 해석할 수 있다.

5. 結 論

本 論文에서 간단한 多變數 化工程시스템을 制御하는데, 從來의 에널로그機器 代身에 마이크로컴퓨터를 利用한 디지털 制御장치를 使用할 수 있음을 보였다. 本 論文의 주요 목적은 새로운 제어이론의 개발이 아니고 이미 알려진 제어이론과 저렴한 마이크로프로세서를 利用하여, 實際의 시스템을 制御하는데 생기는 문제점의 파악 및 이의 해결에 중점을 둔 것으로 일종의 응용논문이라 볼 수 있다. 본 논문실험에서 쓰인 一切의 Hardware는 構造가 비교적 간단하고 國內 取得이 容易하므로 좀 더 개발하면 教育用 制御實驗 장치로 利用할 수 있을 것으로 생각된다.

参 考 文 献

1. Lovett, O.P, April, 1974, "Valve Flow Characteristics", ISA Journal; 11:65-67.
2. Amrik Singh and David Mcwan, "The control of a process having appreciable transport lag; a laboratory case study", IEEE Vol. IECI-22 No. 3, August, 1975 pp. 396-401.
3. Cecil L. Smith, "Digital computer Process control", 1972, International Text book company .
4. Virgil W. Eveleigh, "Adaptive control and optimization techniques", 1967 MCG raw-Hill Inc.
5. Eli Mishkim, and Ludwig Braun, Adaptive control systems", 1961, Mc Graw - Hill Book Company, Inc.
6. Shearer, Murphy, Richardson, "Introduction to systems dynamics", Addison wesley publishing Co, 1967.

