

## 자동화 공정에서의 제어 방식

權 旭 鉉

서울대학교 制御計測工學科

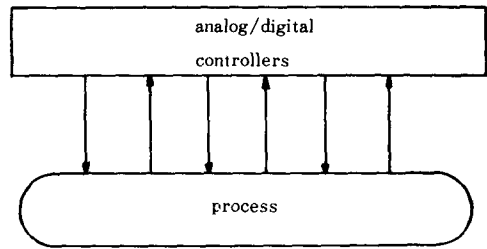
### I. 序 論

자동화 공정에서의 제어방식은 대상 시스템에 따라 많은 차이점을 갖고 있다. 대상 시스템은 규모면에서 보면 모터와 같은 소형 시스템에서부터 정유, 제철, 전력 시스템등과 같은 대형 시스템이 있으며, 내용면에서 볼 때 생산 산업체(manufacturing industry)와 처리 산업체(processing industry)로 크게 구분할 수 있고, 이들 대상 시스템에 따라 제어 방식은 여러 가지 면에서 다르다.

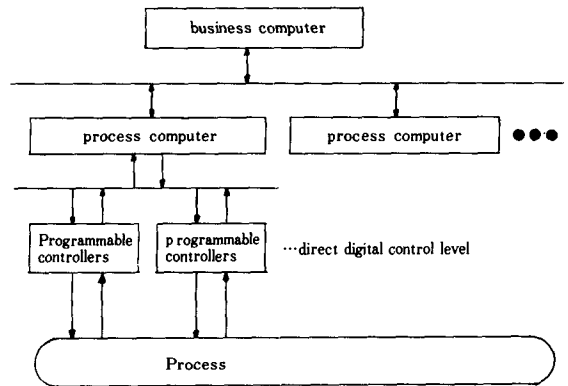
현대의 자동화 특징은 제어 이론적인 면에서 고전적인 제어 방식과 더불어 다변수 제어가 가능한 현대 제어 방식이 사용되기 시작한 것과 하드웨어 측면에서 마이크로프로세서를 포함한 계산기 제어가 많이 사용되고 있다는 점이다. 그 이유로는 마이크로프로세서의 출현으로 복잡한 계산 기능을 싼 가격으로 실현할 수 있게 되었고, 현대 제어 이론이 그동안 실제 사용될 정도로 크게 발전되어 왔으며, 시스템이 복잡해지면서 제어 시스템의 성능에 관한 요구조건이 많아졌다는 것 등을 들 수 있다.

계산기 제어와 관련된 실제 시스템 구성도를 그림 1에 보이고, 대형 시스템에서 각 부분이 담당하는 전형적인 역할을 표 1에 나타내었다. 표 1의 내용은 전형적인 경우에서 이며, 특별한 경우에 프로세스 계산기가 직접 실시간 제어(real-time control)를 행할 수도 있다. 시스템의 응답시간은 DDC(direct digital control) 레벨로 갈수록 빨라야 하며 아주 빠른 응답시간을 요구하는 경우엔 아날로그 회로로 처리하여야 한다. 요구 응답시간은 물론 대상 시스템에 따라 다르다.

제어 방식은 시스템 종류 뿐 아니라 제어 목적에 따라 서로 달라진다. 본 고에서는 상미분 시스템, 시간 지연 시스템등의 분포 정수 시스템, 대단위 시스템등 시스템 종류에 관해서는 언급하지 않으며 제어 목적과 제어 방식에 대하여 논의하기로 한다.



(a) 소형 시스템



(b) 대형 시스템

그림 1. 제어 시스템 구조(계산기 제어측면)

### II. 제어 목표 및 제어 방식

제어 목표와 방식은 매우 다양하여 전부 다루기는 어려우므로 본 고에서는 중요한 것만 다루기로 한다. 제어 방식은 크게 보아 시퀀스 제어와 연속시간 제어로 구분할 수 있다.

시퀀스 제어는 생산 공정에서 릴레이 동작이나 밸브 개폐 및 스위치의 개폐등 제어 루우프에서 미리 정해진 순서에 따라 순차적으로 제어하는 방식이며, 산업

표 1. 대형 시스템에서 각 부분의 역할

	역 할	사용되는 제어방식에
Business Computer Level	정책적인 것이나 작업스케줄링, 전반적인 최적운영 등 경영적인 측면을 담당한다.	linear programming, nonlinear programming, optimization
Process Computer Level	프로세스를 모니터하며, 모델에 기준하여 기준치를 계산하거나 계수식별등의 계산량이 많은 일을 담당한다.	modeling, identification, set value computation
DDC Level (Programmable Controller Level)	프로세스에서 직접 실시간 데이터 수집 및 제어를 담당한다.	feedback (analog) control sequence control

제어에서 자동화로 광범위하게 사용되고 있다. 제어 목표는 원할 경우 가능한 한 빠른 시간내에 동작이 이루어져야 한다는 것, 신뢰성이 있어야 한다는 것, 계수(counting)기능과 시간지연 기능 및 소수의 연산기능등을 포함한 여러가지 기능을 갖추어 다용도에 사용될 수 있는 것등이며 이들에 관한 상세한 논의는 뒤에서 다루기로 한다.

연속시간 제어는 속도, 위치, 유량, 온도, 압력 및 레벨 등과 같이 연속적인 물리량을 일정값으로 유지되도록 제어하는 것이며, 이 경우 출력을 측정하여 그 값을 입력 교정용으로 사용하기 때문에 폐환 제어(feedback control)이라고 많이 불리운다. 연속시간 제어의 대표적인 구조를 그림 2에 보였다. 제어를 수행하기 위해서 우선 실제 시스템의 모델을 구해야 하는데, 선정된 모델과 실제 시스템은 일치하지 않으며 여기서 야기되는 모델링 오차 또는 모델링 되지 않은 동특성은 매우 중요한 문제가 된다. 모델링 오차는 여러 방법으로 나타낼 수 있는데 모델의 파라메타를 미지로 간주하거나 그 상하한을 어떤 범위내로 규정지을 수도 있다.

제어 목표는 대략 다음과 같은 것들을 들 수 있다.

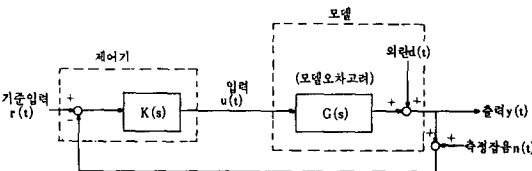


그림 2. 대표적인 폐환 제어 문제

① 출력이 기준 입력을 따라가야 하며 그 속도가 빠를수록 좋다(tracking 및 fast response).

② 시스템이 안정해야 한다(stability).

③ 모델링 오차나 파라메타 변화에 대해서도 안정된 제어가 이루어져야 한다(robustness 및 adaptation)

④ 외란의 영향을 최소화해야 한다. (disturbance rejection).

⑤ 입력의 크기가 너무 크지 않아야 한다.

⑥ 어떤 지정된 목적 함수(performance index)를 최소로 하거나 최대로 한다. (optimization, 예: 최소 에너지, 2차 목적 함수)

⑦ 구현(implementation)이 용이해야 한다.

이러한 목표를 달성하기 위한 제어방식은 다양하며 따라서 분류방법도 여러 가지가 있으나 여기서는 중요한 것만 다루기로 한다. 상기한 바와 같이 모델링 오차가 존재하는 경우에 따라 다음과 같이 분류할 수 있다(제어 목표 ③, ④ 참조):

- 모델과 실제 시스템이 일치...전환적인 방법
- 모델과 실제 시스템 사이에 어느 정도의 오차 존재...강인 제어(robust control)
- 모델에 미지의 파라메타 존재...추정 가능한 입출력을 이용하는 적응제어(adaptive control)

또한, 제어 입력을 구할 때 목적 함수를 사용하는가에 따라 다음과 같이 분류할 수 있다(제어 목표⑥ 참조):

- 목적함수를 사용하여 제어 입력 구함...최적 제어(optimal control)
- 목적함수외의 다른 평가방법으로 제어 입력 구함...극점 배치, 안정도, 정상 상태 오차등의 방법

또한 구현이 용이하게 하기 위한 것으로 비간섭 제어(decoupling control)를 들 수 있는데 이것은 다변수 입력과 출력을 1:1로 대응시키는 보상법을 사용하는 방식이다.

그외에도 폐환을 전혀 사용되지 않을 때 개루우프(open-loop) 제어라 하며, 일부 사용할 경우 폐루우프(closed-loop) 제어로 분류한다. 또한 부분적으로 폐환이 사용될 때 폐환을 하지 않는 부분은 피이드포워드(feedforward) 보상이라 하며 폐환보상과 아울러 사용되고 있다. 표 2에 주요 내용을 보였는데 이 방법은 배타적인 것은 아니며 단순히 상기 제어 목표를 만족시키기 위하여 어떤 특정한 측면만을 강조하여 명칭을 붙인데 불과하다. 제어 목표는 위에서 본 바와 같이 다양하므로 그들을 모두 만족시키는 제어 방식을 체계적으로 구하기는 현재로서는 매우 힘들다. 부분적

으로는 이론이 정립되어 있으며 시행착오와 함께 사용되고 있다. 본 고에서는 표 2에 나열된 제어 방식들에 대하여 간단히 논의하기로 하며 제어 방식들에 관한 구체적인 연구 내용은 방대하므로 중요 문헌과 중요 결과만 다루기로 한다.

표 2. 주요 제어방식과 그 특성

제어방식	특	성	모델링요차고려여부
시퀀스제어	생산공정등에서 스위치 개폐, 릴레이동작, 시간지연기능등의 반복동작을 수행한다.		해당없음
연속시간제어(피관제어)	강인제어	시스템 파라메타가 약간 변하거나 불확실성이 있는 경우 고정이득제어기로서 그 변화를 보상하도록 설계한다.	고려함
	적응제어	시스템 파라메타가 변하거나 미지의 경우에 제어기의 이득을 가변시키는 비선형 제어 방법이다.	고려함
	비강성제어	다변수입력 다변수출력인 경우에 한입력이나 하나의 출력에만 영향을 주도록 제어기를 구성함으로써 산업체현장에서 제어를 쉽게 수행하도록 하며 one-loop controller등의 제어기 사용을 용이하게 한다.	거의 고려되지 않음
	최적제어	목적함수를 정의하고 그것을 최소로 하는 제어입력을 구한다. 과도응답 특성이 중요한 시스템에 사용된다. 단점은 구조를 미리 선정할 수 없는 것이다.	거의 고려되지 않음

III. 시퀀스 제어

전술한 바와 같이 시퀀스 제어는 일반 산업체에서 광범위하게 사용되고 있으며 공장 자동화에도 중요한 비중을 차지하고 있음은 주지의 사실이다. 시퀀스 제어 자체는 이론적인 면이 거의 없으므로 대학에서 교육이 실시되고 있지는 않으나 자동화에서의 중요성으로 인해 현실적인 문제를 이해할 필요가 있다.

일반적으로 시퀀스 제어라 하면 미리 정해진 순서에 따라 제어의 각 단계를 순차적으로 수행해 가는 제어 방식을 일컬으며 이는 개루우프 제어의 일종으로 볼 수 있다. 여기에는 논리적인 연산을 위한 소자(주로 릴레이)와 타이머, 카운터 등이 필요하고 이들을 원하는 제어를 할 수 있도록 구성하는 작업이 요구된다. 60년대 후반에서 70년대 초반 경에 출현한 PC(programmable controller)는 릴레이, 타이머, 카운터 등으로 구성된 제어반(control panel)을 대체하기 위해 개발된 제어기기로서 출현 당시에는 시퀀스 제

어 전용 기기로 사용되었다. PC를 사용할 경우 원하는 제어 기능을 PC 전용언어로 프로그래밍하여 쉽게 실현할 수 있다는 점, 제어 방식을 변경하려는 경우 소프트웨어의 변경만으로 가능하다는 점 등의 경제성, 편의성 및 정확성 등의 측면에서 기존의 제어반보다 장점을 갖고 있어 그 사용이 점점 보편화되었다. 그림 3은 PC를 사용하는 시스템과 가장 일반적인 PC 전용언어인 래더 로직 다이어그램(ladder logic diagram)언어를 사용하여 그 시스템을 프로그래밍한 예이다. 근년에 들어 전자공업의 급속한 발달에 힘입어 PC는 본래의 시퀀스 제어 기능에 아날로그 신호의 제어 기능까지 갖추게 되어 공장 자동화에 가장 폭 넓게 사용되어 가고 있다.

전술한 바와 같이 시퀀스 제어는 이론보다는 그 응용이 광범위하게 이루어지고 또한 중요한분야이다. 복잡한 시퀀스 제어를 가능하게 하고 사용자가 쉽게 쓸 수 있는 제어기기의 개발은 이론만큼이나 중요한 것이므로 이에 대한 지속적인 노력이 필요하다고 보겠다.

IV. 최적 제어(Optimal control)

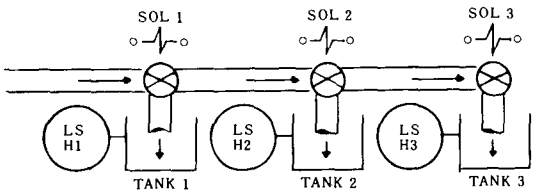
최적 제어는 1950년대와 1960년대에 걸쳐 상태공간(state space)에서 많이 연구되었으며 현재에는 널리 알려진 제어 방식이므로 여기서는 약술하기로 한다. 최적 제어는 다음과 같은 목적함수

$$I = \int_{t_0}^{t_f} L(x(t), u(t), t) dt$$

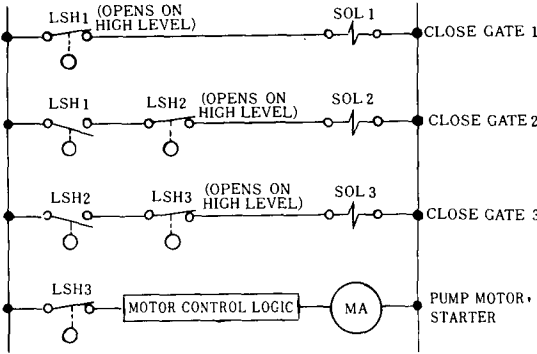
라는 성능척도를 최소 혹은 최대로 하는 제어 입력을 구하는 문제이다.<sup>(6-8)</sup> 이때 상태나 입력에 구속 조건이 부가되기도 한다.

선형과 비선형시스템을 포함한 일반적인 시스템의 최적 제어 문제는 최대 원리(maximum principle), 동적 프로그래밍(dynamic programming) 혹은 변분법(variational calculus) 등으로 해결되어 왔다. 특히 선형 시스템에서 2차 목적함수의 경우는 LQG(linear quadratic gaussian) 문제라 해서 널리 응용되고 있으며 선형 시스템 제어에 큰 영향을 미쳐왔으므로 표 3에 나타내었다. LQ제어기나 LQG제어기는 여러 분야에 응용되어 왔으며 극점배치 제어기, 강인한 제어기 등에 많은 영향을 미쳐왔고 지금도 꾸준히 연구되고 있는 실정이다.

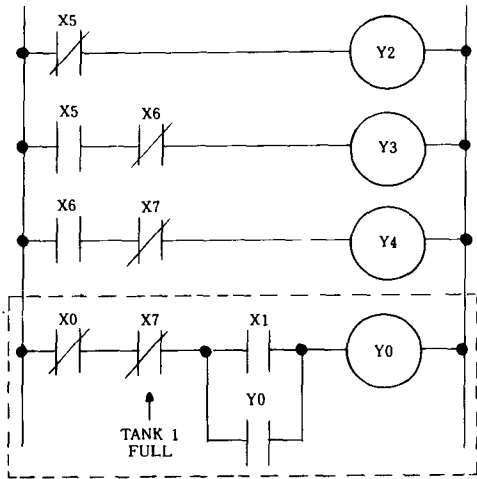
최적 제어를 사용했을 때 문제점은 다음과 같다:  
 • 목적 함수를 사용하여 구해진 제어기가 모델링 오차에 관련된 것과 같은 다른 제어 목표(예: 제어 목표 ①~⑤)를 만족하는지 여부가 확실하지 않다.



(a) 탱크 주입 시스템의 다이어그램



(b) 탱크 주입 시스템의 전기(電氣) 래더 다이어그램



(c) (b)의 래더 로직 다이어그램

그림 3. 전형적인 시퀀스 제어의 예

- 제어기 구조는 최적 제어가 구해진 후에 알수 있으며 미리 선정하기가 어려우므로 가변성(flexibility)이 없다.
- 제어가 폐환 제어 형태로 구해지지 않는 경우가 많다. 그럼에도 불구하고 어떤 유한 시간에서 과도 응답이 중요한 경우(예: 최소시간, 최소에너지 등)에는 널리 사용되고 있는 실정이다.

표 3. LQ 및 LQG 제어기

제어기	LQ 제어기	LQG 제어기
시스템	deterministic 시스템 $\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$ $y(t) = Cx(t)$	확률시스템 $\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + w(t)$ $y(t) = Cx(t) + v(t)$
목적함수	$\int_{t_0}^{t_f}  x'(t)Qx(t) + u'(t)Ru(t)  dt$	$E \left[ \int_{t_0}^{t_f}  x'(t)Qx(t) + u'(t)Ru(t)  dt \right]$ 단, $u(t)$ 는 $y(t)$ 의 함수
해	$u(t) = -R^{-1}B'K(t)X(t)$ 단, $K(t)$ 는 레귤레이타 Riccati 방정식의 해	$u(t) = -R^{-1}B'K(t)\hat{X}(t)$ kalman filter: $\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + P(t)CM^{-1}(y(t) - C\hat{x}(t))$ 단, $P(t)$ 는 필터 Riccati 방정식의 해

V. 강인한 다변수 제어(Robust multivariable Control)

일반적으로 강인한 제어란 외란이나 모델링되지 않은 공정 동특성 등의 불확실성(uncertainty)에도 불구하고 전체 시스템의 안정도를 유지하는 제어를 일컫으며, 강인성(robustness)이란 강인한 안정도(robust stability)를 뜻하는게 보통이다.

폐환 제어 설계는 주파수 영역 설계와 시간 영역 설계의 두가지 접근 방식으로 나뉜다. 고전적인 주파수 영역 설계는 그 기본을 Nyquist와 Bode 이론에 두고 있으며 불확실성에 대한 견딜이라는 요구 조건을 자연스럽게 만족시킬 수 있는 설계 방법이지만 다변수 시스템으로의 확장이 어렵다는 단점을 갖고 있다. 반면에 시간 영역 설계에 의하면 최적 제어, 확률 제어 등의 현대 제어 이론을 응용하여 다변수 시스템을 쉽게 다룰 수 있으나 전술한 바와 같은 실질적인 설계 목표와 최적을 위한 개념 사이의 명확한 관계를 규정 짓기가 힘들다는 단점이 있다.

강인성에 대한 분석도 주파수 영역 분석과 시간 영역 분석으로 크게 나누어 볼 수 있다. 주파수 영역 분석에서는 강인성에 대한 척도로 singular value를 이용하며,<sup>19, 14-17)</sup> 시간 영역 분석은 고유치 분석<sup>18)</sup> 또는 Lyapunov 안정도 분석<sup>19-20)</sup> 등을 이용하여 이루어진다. 최근에 이 두 접근 방식의 장점을 이용하여 강인한 제어를 설계하는 연구가 활발히 진행되어 왔다. 대표적인 것으로 LQG/LTR 방법(linear quadratic gaussian /loop transfer recovery method)를 들 수 있는

데, 이는 고전적인 주파수 영역에서의 loop-shaping 방법을 다변수 시스템의 경우로 확장시키고 최적 제어에서의 LQG 설계방법을 이용하여 요구되는 loop-shape를 갖게 되도록 한다.<sup>19)</sup> 이외에도 ring에서의 인수 분해 방식 (factorization approach) 등을 이용하여 Q매개변수를 선택하여 제어기를 구성하기도 하고,<sup>10-12)</sup> 비선형 프로그래밍을 이용하여 강인한 servomechanism을 설계하는 것도 연구되었다.<sup>13,14)</sup>

강인한 제어기 설계 및 강인성 분석에서 중요한 것은 실제 상황에 더 가까운 불확실성을 어떻게 정의하는지 하는 문제인데, 대부분의 연구들에선 불확실성에 특별한 구조를 가정하지 않고 그 크기만을 가정하고 있으며 (unstructured uncertainty), 구조를 갖는 불확실성 (structured uncertainty)을 가정한 연구 결과<sup>15,21)</sup>도 있다.

여기서는 이들 중 unstructured uncertainty를 가정한 LQG/LTR 방법<sup>19,22)</sup>에 대해 간략히 살펴보기로 한다. 그림 2와 같은 케환 시스템에서 입출력 관계 및 민감도 (sensitivity) 는

$$y = GK(I+GK)^{-1}(r-n) + (I+GK)^{-1}d \quad (5.1)$$

$$e \triangleq r-y = (I+GK)^{-1}(r-d) + GK(I+GK)^{-1}n \quad (5.2)$$

$$\Delta H_{oi} = (I+G'K)^{-1}\Delta H_{oi} \quad (5.3)$$

과 같이 주어진다. 여기서 G는 플랜트, K는 제어기를 나타내며 r, u, y, d 및 n은 각각 기준 입력, 제어 입력, 출력, 외란 및 측정 잡음이며  $\Delta H_{oi}$ 과  $\Delta H_{oi}$ 은 플랜트 변화 ( $G' = G + \Delta G$ )에 따른 페루우프 시스템과 개루우프 시스템에서의 변화를 나타낸다. SISO (single-input single-output)에서의 loop-shaping 방법을 다변수 경우로 확장하기 위해 spectral norm을 행렬의 크기를 나타내는 척도로 사용한다. 즉,

$$G'(j\omega) = [I+L(j\omega)]G(j\omega) \quad (5.4)$$

$$\overline{\sigma}[L(j\omega)] < l_m(\omega), \quad \forall \omega \geq 0 \quad (5.5)$$

로 두면 (여기서  $\overline{\sigma}$ 는 singular value의 최대값을 뜻한다) 다변수 경우로 일반화된 Nyquist criterion에 의해 시스템이 안정할 필요충분조건은

$$\overline{\sigma}[GK(I+GK)^{-1}] < \frac{1}{l_m(\omega)}, \quad \forall \omega \geq 0 \quad (5.6)$$

로 주어진다. 또한, 제어 성능의 측면에서 보면 식 (5.2)로부터  $(I+GK)^{-1}$ 의 크기가 작아야 훌륭한 성능을 보이게 된다. 즉,

$$ps(\omega) \leq \underline{\sigma}[I+G(j\omega)K(j\omega)] \quad (5.7)$$

의 관계를 만족해야 하는데 이것은

$$\frac{ps(\omega)}{1-l_m(\omega)} \leq \underline{\sigma}[G(j\omega)K(j\omega)] \quad (5.8)$$

과 같은 조건이다. 여기서  $\underline{\sigma}$ 는 singular value의 최소값을 나타내고 ps( $\omega$ )는 양함수이며, 식 (5.8)의 관계는  $l_m(\omega) < 1$ 이고  $\underline{\sigma}[G(j\omega)K(j\omega)] \gg 1$ 인 주파수 영역에서 성립해야 한다. 위의 두 조건 (5.6)과 (5.8)을 그림으로 나타내면 그림 4와 같다. 이 그림 4와 같은 loop-shaping을 만족시키는 한 방법이 LQG/LTR 방법인데 이 방법엔 시스템이 minimum phase 이어야 하고 입력의 수가 최소한 출력의 수와 같아야 한다는 제약이 있으며, 그 설계 과정은 먼저 full-state LQ 조정기를 설계한 후 kalman 필터의 이득을 조정하여 루우프 전달 회복 (loop transfer recovery)를 이루어 강인성을 개선하는데<sup>19,22)</sup> 자세한 과정은 약하기로 한다.

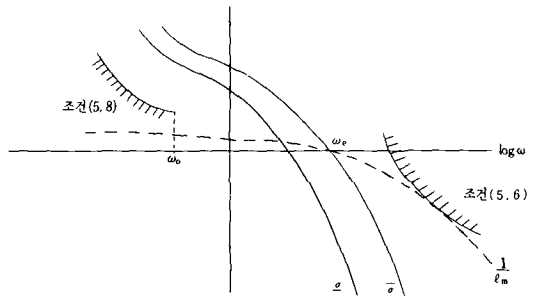


그림 4. 케환 시스템의 loop-shaping (다변수 경우)

### VI. 적응 제어 (Adaptive Control)

적응 시스템이란 시스템 내부나 외부에서 일어나는 예측 불가능한 변화에 대해 적응할 수 있는 시스템을 뜻하며 적응 제어에 대한 연구는 1950년대에 항공기 자동 제어로부터 비롯되었다. 1960년대의 괄목할 만한 제어 이론의 발달과 마이크로 일렉트로닉스의 급속한 발전으로 인해 적응 시스템은 1970년대에 이르러 재조명 받게 되었다.<sup>23-25)</sup> 안정성에 관한 일반적인 이론, 최적 시스템 이론, 확률 제어 이론 및 쌍대 제어 (dual control) 이론 등에 근거하여 적응 시스템 이론이 개발되었으며, 적응 제어는 이득 계획 (gain scheduling) 방법, 기준 모델 적응 시스템 (MRAS : model reference adaptive system) 방법 및 자기 동조 조정기 (STR : self-tuning regulator) 방법으로 크게 나누어 볼 수 있다.

1. 이득 계획 방법

공정 동특성의 변화를 잘 나타내는 부차적인 공정 변수를 찾을 수 있는 경우에 조정기의 매개변수를 부차적인 공정 변수의 함수로 두어 공정 변화의 영향을 없애는 방법이며, 시스템을 공정 이득의 변화만을 수용하는데 사용하므로 이득 계획 방법이라 불린다. 이 방법은 그림 5에서 보는 바와 같이 피이드포워드 제어처럼 개루우프 방법이므로 이득 계획이 부정확할 경우에 그것을 보상할 수 있는 제환이 이루어지지 않는다는 단점이 있으나 공정 변화에 신속히 대응하여 조정기 파라미터를 변화시킬 수 있다는 장점이 있다.

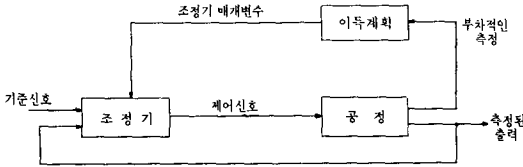


그림 5. 이득계획 방법을 사용하는 시스템의 블록선도

2. MRAS방법

MRAS방법은 원하는 특성을 갖는 기준모델을 설정한 후 그의 평가 지표와 조정가능한 시스템 (adjustable system)의 평가지표를 비교하여 그 차이를 줄이는 식으로써 공정의 출력이 기준 모델의 출력을 따라가도록 하는 방식이다.<sup>[24]</sup> 그림 6의 블록선도에서 보듯이 기준 모델은 제어 시스템의 일부분을 이루고 있으며, 제어 시스템은 조정기와 공정으로 구성되는 통상의 제어 루우프인 내부 루우프(inner loop)와 조정기의 파라미터를 조절하는 외부 루우프(outer loop)로 구성된다.

MRAS형태의 적응 시스템의 설계에는 주로 Lyapunov의 안정도 이론과 Popov의 초안정도 이론이 응용된다.<sup>[25, 27, 29]</sup>

Lyapunov의 안정도 이론을 이용한 적응법칙은 출력에 미분이 필요하다는 단점을 갖고 있었으며<sup>[26]</sup> 이를 보완한 것이 상태 변수 필터를 사용한 방법이었다.<sup>[24]</sup> 이와 같이 적응 제어는 직접 제어를 구성하는 직접 제어 방식과 관측자 등을 이용하는 간접 제어 방식이 있으며 이들은 궁극적으로 같은 형태임이 증명되었다.<sup>[28]</sup>

초안정도 이론이 MRAS에 처음 이용됐을 때는 병렬형 MRAS<sup>[29]</sup>이었으나 이 형태가 수렴 속도가 느리다는 단점을 보완하기 위해 직렬형에 비례 및 적분항을 첨가한 PI적용화 기법이 사용되었다.<sup>[30]</sup>

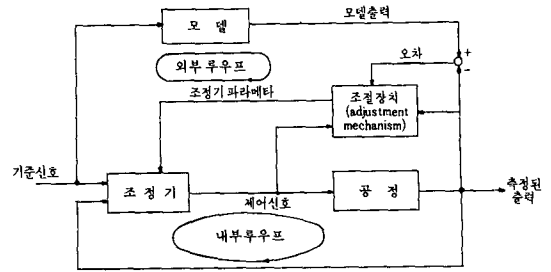


그림 6. MRAS방법을 사용하는 시스템의 블록선도

이와 같은 안정도 이론을 이용한 적응 제어 시스템 설계법은 안정도 이론을 적용하기 위해서 확대 오차등을 이용하므로 일반적으로 수렴 속도가 느리다는 단점이 있으며, 이를 부분적으로 보완한 연구 결과도 있다.<sup>[31]</sup>

3. STR방법

STR방법은 공정의 계수를 알고 있는 것으로 가정하여 조정기를 구성한 후 공정의 미지 계수들을 여러 식별법에 의해 추정하여 certainty equivalence 원리<sup>[32]</sup>에 의해 추정된 공정 계수들로부터 조정기 계수를 구하는 것이다.

STR방법은 융통성이 큰 설계 방법이며 위상과 이득 여유, 극 배치, 최소 분산 제어 및 LQG제어 등에 의한 STR이 고안되었으며, 확률·근사, 최소 자승법, 확장 칼만 필터 및 ML(maximum likelihood)방법 등의 여러가지 추정 방법도 사용되었다.<sup>[33]</sup>

그림 7의 STR은 조정기 계수가 설계 계산(design calculation)에 의해 간접적으로 갱신되므로 기준 모델에 의해 계수 추정이 이루어지는 경우엔 간접 MRAS라고도 불리운다.<sup>[34]</sup> STR은 전술한 바와 같이 융통성이 크며 또한 이해하기도 쉬우므로 최근에 이에 대한 연구가 활발히 진행되었다.<sup>[35], [36], [38]</sup> 그림 7의 STR은 명시적인 공정 모델 계수의 추정을 행하므로 명시적 STR

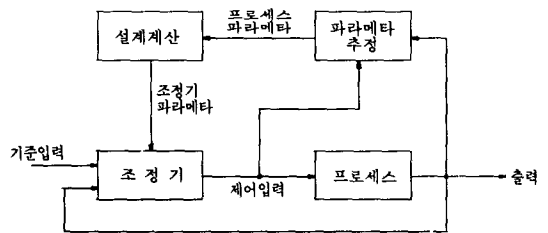


그림 7. STR방법을 사용하는 시스템의 블록선도

(explicit STR)이라고 불리우며, 이에 반하여 공정 계수를 조정기 계수로 표현하면 설계 계산이 필요없게 되어 알고리즘이 간단해진 암시적 STR(implicit STR)이 되며 이것은 직접 MRAS와 밀접한 관계가 있다.<sup>[24],[34]</sup>

4. PID/ST(PID Self-Tuner)

산업 공정에서 가장 많이 쓰이고 있는 제어기 중의 하나가 PID제어기이다. PID제어기는 추적능력이 뛰어나고 저주파 성분의 모델링 오차에 강인하다는 것 등의 장점을 갖추고 있으나, 모델 불확실성이 크거나 제어 성능에 대한 요구가 까다로운 경우에 고정된 PID 계수 만으로는 충분한 제어성능을 보일 수 없게 된다.

PID/ST는 certainty equivalent제어기의 일종으로서 적응 제어의 개념을 도입하여 PID계수를 동조하는 것이며, 크게 간접PID/ST, 직접PID/ST 및 ECM (explicit criterion minimization) PID/ST의 셋으로 나누어 볼 수 있다.

간접PID/ST<sup>[35]</sup>는 추정된 공정의 페루우프 전달함수의 분모가 설계자가 원하는 특성 방정식과 일치하도록 PID계수를 조절하는 방법으로서 공정의 매개변수를 식별하고 제어기를 설계하는 두 과정으로 이루어진다. 이 두 과정을 하나로 줄여 제어기 계수로서 공정의 입력 출력 관계를 찾는 방식이 직접PID/ST<sup>[36]</sup>이다. 직접 구조를 사용하는 주된 이유는 계산량이 감소한다는 것 이외에도 excitation level에 관계없이 안정하다는 것이 증명되기 때문이다. ECM PID/ST<sup>[36]</sup>는 주어진 지표 함수를 최소화시키는 PID계수를 찾는 방법을 사용한다. 이 방법은 모델의 차수 등에 제약을 받지 않으므로 극점 배치 형태인 직접PID/ST나 간접PID/ST에 비해 상당히 개선된 것이나 PE조건(persistent excitation condition)에 상당한 영향을 받는다는 단점을 갖고 있다.

5. 강인한 적응 제어(robust adaptive control)

1980년대 초반까지 적응 제어에 대한 연구는 초기값에 관계없이 적응 제어 시스템이 안정하다는 것을 입증한 것이다. 이들에 있어서의 전형적인 가정은 공정 전달 함수의 분모 다항식과 분자 다항식의 차수 차이가 알려져 있으며 분자 다항식은 안정하다는 것인데 이는 매우 비현실적인 가정이라 볼 수 있다. 따라서, 명목상의 공정에 대해 안정하게 설계된 적응 제어기가 실제의 공정에 대해 어느 정도 안정성을 유지할 수 있는가 하는 강인성의 문제가 적응 제어에서도 중요하게 부각되며 1980년대에 이르러 활발히 연구되고 있는 분

야이다.<sup>[37-39]</sup>.

모델링되지 않은 동특성에 의한 영향에 대한분석<sup>[38]</sup>과 아울러 그 해결방안으로 적응이득을 작게 유지하고 샘플링을 느리게 하는 방법<sup>[39]</sup>과 특정 주파수 영역에서만 동작시키는 주파수 선택적 적응 제어기<sup>[40]</sup>등이 제안되었다. 또, 모델링되지 않은 동특성에도 안정성을 유지할 수 있는 초기치 영역을 규정하고 그 영역이 넓어지도록 적응 법칙을 수정한 연구 결과<sup>[37]</sup>도 있으며, sector방법을 응용한 SPR보상기(strictly positive real compensator)<sup>[41]</sup> 및 매개변수 수렴을 전제로 하는 강인한 적응 제어기<sup>[42,43]</sup>등에 관한 연구 결과도 있다.

이들 모든 방식은 높은 적응 이득과 고주파 입력을 피해야 한다는 것을 나타내고 있으며 자세한 논의는 지면 관계상 생략하기로 한다.

VII. 비간섭 제어(Decoupling or Noninteracting Control)

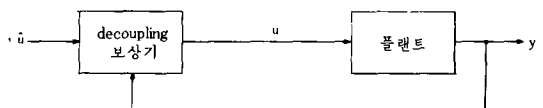
다변수 시스템에서 각 시스템의 출력이 그에 해당되는 입력과 1:1 대응 관계가 있으면 제어기 구현이 용이하게 된다.

그림 8에서 보는 바와 같이 새로운 입력  $\hat{u}$ 와 출력  $y$  사이의 전달 함수는 보상기를 통하여 이상적인 경우에

$$y(s) = \begin{bmatrix} h_1(s) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & h_2(s) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & h_m(s) \end{bmatrix} \hat{u}(s)$$

와 같이 1:1로 대응되어 SISO시스템에서의 설계 방법을 적용시킬 수 있다는 장점을 갖게 된다. 이런 비간섭 구조는 터어보 엔진 제어, 보일러 제어 및 VTOL 항공기 제어 등의 여러 분야에 응용되며, decoupling 방법은 제어기 구성시 상태나 출력 변수를 이용하는 static decoupling 방법<sup>[47-51,55]</sup>과 제어기에 또다른 동적 시스템을 사용하는 dynamic decoupling 방법<sup>[51-56]</sup>으로 나누어 진다.

Decoupling에 관한 연구는 일찍부터 시작되었다.<sup>[44]</sup>



이상적인 전달함수:  $y_i(s) = h_i(s) \hat{u}_i(s), i=1, 2, \dots, m$

그림 8 비간섭 제어기

1950년대 중반에 전달 행렬 방법(transfer matrix method)가 정립되었는데<sup>[46]</sup> 이 방법은 설계자가 원하는 페루우프 전달함수를 구현하도록 제어기를 구성하는 것으로 realizability와 stability 문제를 안고 있었다. 또한 bode 다이어그램 등의 주파수 영역 방법을 이용하는 시도도 이루어졌으나<sup>[46]</sup> 제한된 성과밖에 얻지 못했다.

1964년에 이르러 상태 제환 제어에 의한 static decoupling 방법이 처음으로 나타났으며<sup>[47]</sup> 이에 의해 decoupling에 대한 연구가 촉진되었다.<sup>[48,49]</sup> Geometric 접근 방법으로도 static decoupling 문제를 다루어 존재 조건 및 극 배치에 관해 연구되었으며<sup>[50]</sup> 상기 방법과 다른 각도에서도 static decoupling 문제가 다루어졌다.<sup>[51]</sup>

동적 보상에 의한 dynamic decoupling 방법은 1969년에 출현하여 비간섭화된 시스템의 구조 및 극 배치 문제와 저차수 보상기를 합성하는 과정이 연구되었다.<sup>[52]</sup> 또한, 행렬 접근 방법(matrix approach)<sup>[53,54]</sup>이나 전달 행렬 접근방법(transfer matrix approach)<sup>[55,56]</sup>에 의해서도 dynamic decoupling 문제는 연구 되었다.

## VIII. 結 論

자동화에 사용되는 제어방식은 적용되는 시스템 종류 및 제어목표에 따라 다양하나 본 고에서는 주요 제어방식만을 다루었다. 각 제어방식에 관련된 연구결과는 지면관계상 개념적인 면과 주요 결과만을 설명하였다. 본 고가 제어방식을 개괄하는 데 도움이 되었으면 한다. 여기서 소개된 제어방식의 실제 시스템에서 응용은 앞으로 꾸준히 증가하리라고 생각된다.

## 參 考 文 獻

- [1] R. Isermann, "Advanced methods of process computer control for industrial processes," *Computer in Industry*, vol. 2, pp. 59-72, 1981.
- [2] F. Harashima, et. al., "Status review-Applications of modern control theory," Proc. of IECON Conference, pp. 61-71, 1984.
- [3] P.V. Kokotovic, "Recent trends in feedback design: An overview," *Automatica*, vol. 21, pp. 225-236, 1985.
- [4] K.J. Astrom, "Theory and application of adaptive control," 8th IFAC World Congress, pp. 737-748; 1981.
- [5] K.J. Astrom, "Process control-past, present, future," *IEEE Control System Magazine*, vol. 5, pp. 3-10, 1985.
- [6] M. Athans and P.L. Falb, *Optimal Control*, McGraw-Hill, 1966.
- [7] H. Kwakernaak and R. Sivan, *Linear Optimal Control Systems*, Wiley-Interscience, 1972.
- [8] B.D.O. Anderson and J.B. Moore, *Linear Optimal Control*, Prentice-Hall, 1971.
- [9] J.C. Doyle and G. Stein, "Multivariable feedback design: concept for a classical/modern synthesis," *IEEE Trans. Autom. Contr.*, vol. AC-26, pp. 4-16, 1981.
- [10] C.A. Desoer, R.W. Lin, J. Murray and R. Saeks, "Feedback system design: the fractional representation approach to analysis and synthesis," *IEEE Trans. Autom. Contr.*, vol. AC-25, pp. 342, 1980.
- [11] G. Zames "Feedback and optimal sensitivity: model reference transformations, multiplicative seminorms, and approximate inverses," *IEEE Trans. Autom. Contr.*, vol. AC-26, pp. 301-320, 1981.
- [12] M. Vidyasagar, *Control System Synthesis: A Factorization Approach*, MIT press, 1985.
- [13] E.J. Davison and I.J. Ferguson, "The design of controllers for the multivariable robust servomechanism problem using parameter optimization method" *IEEE Trans. Autom. Contr.*, vol. AC-26, pp. 93-110, 1981.
- [14] E.J. Davison and B.R. Copeland, "Gain margin and time lag tolerance constraints applied to the stabilization problem and robust servomechanism problem," *IEEE Trans. Autom. Contr.*, vol. AC-30, pp. 229-239, 1985.
- [15] M.G. Safanov and M. Athans, "A multi-loop generalization of the circle criterion for stability margin analysis," *IEEE Trans. Autom. Contr.*, vol. AC-26, pp. 415-422, 1981.
- [16] N.A. Lehtomaki, N.R. Sandell and M. Athans, "Robustness results in LQG



- based multivariable control designs," *IEEE Trans. Autom. Contr.*, vol. AC-26, pp. 75-93, 1981.
- [17] J.C. Doyle, "Analysis of feedback systems with structured uncertainty," *IEE proc.*, vol. 129, pt. D, pp. 242-250, 1982.
- [18] J. Ackermann, "Parameter space design of robust control systems," *IEEE Trans. Autom. Contr.*, vol. AC-25, pp. 1058-1071, 1980.
- [19] M. Eslami and D.L. Russel, "On stability with large parameter variations stemming from the direct method of Lyapunov," *IEEE Trans. Autom. Contr.*, vol. AC-25, pp. 1231-1234, 1980.
- [20] R.V. Patel, M. Toda and R. Sridhar, "Robustness of Linear quadratic state feedback designs in the presence of design uncertainty," *IEEE Trans. Autom. Contr.*, vol. AC-22, pp. 945-947, 1977.
- [21] H.K. Khalil, "On the robustness of output feedback control methods to modeling errors," *IEEE Trans. Autom. Contr.*, vol. AC-26, pp. 524-527, 1981.
- [22] J.C. Doyle and G. Stein, "Robustness with observers," *IEEE Trans. Autom. Contr.*, vol. AC-24, pp. 607-611, 1979.
- [23] K.J. Astrom, U. Borrisson, L. Ljung and B. Wittenmark, "Theory and applications of self-tuning regulators," *Automatica*, vol. 13, pp. 457-476, 1977.
- [24] I.D. Landau, *Adaptive Control-The Model Reference Approach*, Marcel Dekker, New York, 1979.
- [25] I.D. Landau, "A survey of model reference adaptive technique-Theory and applications," *Automatica*, vol. 10, pp. 353-379, 1974.
- [26] P.C. Praks, "Lyapunov redesign of model reference adaptive systems," *IEEE Trans. Autom. Contr.*, vol. AC-11, pp. 362-367, 1966.
- [27] R.V. Monopoli, "Model reference adaptive control with an augmented error signal," *IEEE Trans. Autom. Contr.*, vol. AC-19, pp. 474-484, 1974.
- [28] K.S. Narendra and L.S. Valavani, "Direct and indirect model reference adaptive control," *Automatica*, vol. 15, pp. 653-664, 1979.
- [29] I.D. Landau, "A hyperstability criterion for model reference adaptive control system," *IEEE Trans. Autom. Contr.*, vol. AC-14, pp. 552-555, 1969.
- [30] I.D. Landau, "Unbiased recursive identification using model reference adaptive technique," *IEEE Trans. Autom. Contr.*, vol. AC-21, pp. 194-202, 1976.
- [31] I.D. Landau and H.M. Silveira, "A stability theorem with application to adaptive control," *IEEE Trans. Autom. Contr.*, vol. AC-24, pp. 305-311, 1979.
- [32] H. Kurz, R. Isermann, and R. Schumann, "Experimental comparison and application of various parameter adaptive algorithms," *Automatica*, vol. 16, pp. 117-133, 1980.
- [33] K.J. Astrom and B. Wittenmark, "On self-tuning regulators," *Automatica*, vol. 9, pp. 185-199, 1973.
- [34] B. Egardt, "Stability analysis of discrete time adaptive control systems," *IEEE Trans. Autom. Contr.*, vol. AC-25, pp. 710-716, 1980.
- [35] R. Ortega and R. Kelly, "PID self-tuners: some theoretical and practical aspects," *IEEE Trans. Ind. Electr.*, vol. IE-31, pp. 332-338, 1984.
- [36] G.C. Goodwin and P.J. Ramadge, "Design of restricted complexity adaptive regulators," *Proc. 19th IEEE conf. Decision and Control*, 1980.
- [37] P.A. Ioannou and P.V. Kokotovic, "Robust redesign of adaptive control," *IEEE Trans. Autom. Contr.*, vol. AC-29, pp. 202-211, 1984.
- [38] C.E. Rohrs, M. Athans, L. Valavani, and G. Stein, "Robustness of adaptive control algorithms in the presence of unmodelled dynamics," *Proc. 21th IEEE Conf. Decision and Control*, pp. 3-11, 1982.
- [39] C.E. Rohrs, M. Athans, L. Valavani, and G. Stein, "Some design guidelines for discrete time adaptive controllers," *Automatica*, vol. 20, pp. 653-660, 1984.
- [40] C.E. Rohrs, "A frequency selective adaptive controllers," *Proc. 22th IEEE Conf. Decision and Control*, pp. 991-996, 1983.
- [41] R.L. Kosut and B. Friedlander, "Robust

- adaptive control conditions for global stability," *IEEE Trans. Autom. Contr.*, vol. AC-30, pp. 610-624, 1985.
- [42] B. Wittenmark and K.J. Astrom, "Practical issues in the implementation of self-tuning control," *Automatica*, vol. 20, pp. 595-605, 1984.
- [43] R. Ortega, "Assessment of stability robustness for adaptive controller," *IEEE Trans. Autom. Contr.*, vol. AC-28, pp. 1106-1109, 1983.
- [44] A.S. Morse and W.M. Wolovich, "Status of noninteracting control," *IEEE Trans. Autom. Contr.*, vol. AC-16, pp. 568-581, 1971.
- [45] R.J. Kavanagh "Multivariable control system synthesis," *AIEE Trans. (Appl. Ind.)*, vol. 77, pp. 425-429, 1958.
- [46] K. Chen, R.A. Mathias, and D.M. Santer, "Design of noninteracting control systems using Bode diagrams," *AIEE Trans. (Appl. Ind.)*, vol. 80, pp. 336-346, 1962.
- [47] B.S. Morgan, Jr., "The synthesis of linear multivariable systems by state variable feedback," Proc. JACC, Stanford, Calif., pp. 468-472, 1964.
- [48] P.L. Falb and W.A. Wolovich, "Decoupling in the design and synthesis of multivariable control systems," *IEEE Trans. Autom. Contr.*, vol. AC-12, pp. 651-669, 1967.
- [49] E.G. Gilbert, "The decoupling of multivariable systems by state feedback," *SIAM J. Contr.*, vol. 7, pp. 50-63, 1969.
- [50] W.M. Wonham and A.S. Morse, "Decoupling and pole assignment in linear multivariable systems: A geometric approach," *SIAM J. Contr.*, vol. 8, pp. 141-149, 1970.
- [51] L.M. Silverman and H.J. Payne, "Input-output structure of linear systems with application to the decoupling problems," *SIAM J. Contr.*, vol. 9, pp. 199-233, 1971.
- [52] A.S. Morse and W.M. Wonham, "Decoupling and arbitrary pole placement by dynamic compensation," *SAIM J. Contr.*, vol. 8, pp. 317-337, 1970.
- [53] L.M. Silverman, "Decoupling with state feedback and precompensation," *IEEE Trans. Autom. Contr.*, vol. AC-15, pp. 487-489, 1970.
- [54] A.S. Morse, "Output controllability and system synthesis," *SIAM J. Contr.*, vol. 9, pp. 143-148, 1971.
- [55] W.A. Wolovich, *Linear Multivariable Systems*, Springer-Verlag, New-York, 1974.
- [56] M.L.J. Hautus and M. Heymann, "Linear feedback decoupling-Transfer function analysis," *IEEE Trans. Autom. Contr.*, vol. AC-28, pp. 823-832, 1983.\*

◆ 用語解説 ◆

**형상 기억 합금(SMA : shape memory alloy)**

1960년대에 미국의 해군연구소에서 니켈과 티타늄을 합성하여 개발한 합금으로서 일단 어떤 형태로 가공하면 그 형태를 기억하여 변형을 가해도 다시 원래의 형태로 돌아가는 성질의 합금.

**VAB(voice answer back)**

청각 응답 장치를 사용하여 컴퓨터 시스템을 전화망에 연결하여 전화 형태의 단말기로부터 조회에 음성 응답을 제공한다. 청각 응답은 미리 계수 코드화된 음성이나 디스크 기억 장치에 기록된 단어군으로부터 구성된다.

**WP(word processing)**

대화식 정보 추출 시스템이나, 경영 정보 시스템, 편집, 번역, 식사 기능 등을 모두 포함하는 작업 등을 말함.