

制御工學의 실제

卜 增 男*

— 차 례 —

- 1. 머릿말
- 2. 제어시스템 설계방법에 대하여
 - 2.1 古典的 設計方法
 - 2.2 現代的 設計方法
- 3. 制御工學의 最近傾向
- 4. 遲延시스템(Time-delay System)에 관하여
- 5. 맺는말

1. 머릿말

생산산업의 現代化 정도를 가름할 때 흔히 그 해당 공정이 일만큼의 비율로 自動制御장치가 되어 있느냐 하는 것을 척도로 할 만큼 制御工學(Control Engineering)이 일반 생산 산업에 미치는 영향은 크다고 믿어진다. 이처럼 自動制御化의 인기가 높은 것은 단순히 그렇게 함으로써 便利한 것 뿐만 아니라, 그 기업의 수익을 증가시키기 때문일 것이다. 기업가의 입장에서 볼 때, 自動制御의 결과로 (i)生産速度를 增加시키고, (ii)規格値로 부터의 誤差를 줄임으로써 제품의 質을 向上시키고 (iii)生産原料를 절약하여 원가절감을 할수 있는 등의 利點이 있다. 이 외에도 일상생활 환경에서 접하는 엘리베이터의 昇降제어부터 宇宙船의 비행제어에 이르기까지 制御의 개념은 現代技術文明의 本質인 것이다.

본란을 통하여, 제어공학자들이 현재 사용하고 있는 설계방법과 앞으로의 발전경향에 대하여 간단히 소개하고, 아울러 학계 및 제어공학자들의 많은 관심을 모으고 있는 遲延시스템(Time-delay system)의 제어문제에 대하여 개략적으로 설명하기로 한다.

2. 제어시스템 설계방법에 대하여

제어시스템의 설계방법으로, 편의상 古典的 設計方法과 現代式 設計方法으로 크게 구분한다. 前者는 잘

알려져 있는 Bode diagram이나 Root-locus method 등을 이용하는 방법으로 비교적 간단한 線型시스템의 자동제어설계에 많이 쓰이고 있다. 後者, 즉 現代式 설계기법은 狀態空間의 解析(Analysis of State-Space)과 最適制御(Optimal Control)의 개념을 이용하는 방법으로서 복잡다단한 시스템의 제어설계에 이용된다. 이 절에서 이 두가지 방법을 비교검토하기로 하겠다.

2-1. 古典的 設計方法

이것은 周波數領域(Frequency Domain)에서 설계자료를 얻는 方法으로 Nyquist의 安定判別法, Evans의 Root-locus technique, Bode diagram을 이용하는 방법, Nichols chart를 쓰는 방법 등이 있다. 보통은 그레프상에서 Bandwidth, Resonant Frequency, Gain and Phase Margin 등을 조작하여 시스템의 상대적 안정도(Relative Stability)를 주어진 규격에 맞도록 한다. 이미 1955년 이전에 개발 완성된 이 방법은 雜音(Norse)문제처리에 상당히 효과적이며 安定度 判定이 용이한 점등 여러 가지 장점이 있기 때문에, 비교적 간단한 線型시스템의 제어설계에 아직도 많이 사용되고 있다. 이 방법은 Describing Function Technique 과 더불어 간단한 非線型시스템 설계에도 이용될 수 있다.

그러나, 주파수 영역의 用語로 주어지는 설계스펙(Design Specification)은 어디까지나 定性的인 記術에 그친다. 또한 많은 경우의 설계메타는 直感和 경험을 통해 試行差誤(Trial and Error)를 거쳐 얻어지며, 最適制御설계를 하기 어렵기 때문에 불만스럽다.

* 正會員 : 韓國科學院 電氣·電子工學科 助教授(工博)

더욱이 이 古典的 技法은 多入力-多出力시스템(Multiple Input-Multiple Output System)의 制御설계에는 적합하지 않고, 또 시스템의 구조가 시간에 따라 變하는 소위 Time-varying System의 경우 이 방법을 적용할 수 없다.

2-2. 現代式 設計方法

이것은 時間領域(Time Domain)에서 設計데이터를 求하는 해석적 방법(Analytic Method)이다. 이 方法에서는 설계할 제어시스템의 요구되는 특성을 數學的 言語로 記術하는 것을 第一段階로 하고 있다. 즉 설계 목표를 일단, (i)제어되는 工程의 數學的 모델, (ii)初期조건과 최종 목표 상태(Target State), (iii)許容되는 制御入力群(Set of Admissible Controls), 및 (iv)性能係數(Performance Index)로 나누어 定義한다. 이때 보통, 수학적 모델로는

$$\frac{dx}{dt} = f(x(t), u(t), t), \quad x = (x^1, \dots, x^n)$$

와 같은 狀態微分方程式으로 表示되고 初期 및 최종 목표상태는 $x(t_0) = x_0$, $x(t_1) = x_1$ 과 같이 n-vector로 주어진다. 性能係數는 各各의 制御入력에 對한 判定기준으로서, 이 기준에 의하여 어떤 제어입력이 最適制御入力(Optimal Control)인가를 가름하게 된다. 現代制御工學에서, 制御問題(Control Problem)라 하면 위에 말한 네 조건으로 형성된 문제로서, 예를 들어 最小 에너지 問題(Minimum Energy Problem)는 다음과 같은 형태로 주어진다. 주어진 사용가능한 제어입력군 중에서 제어될 工程을 初期狀態에서 최종상태로 보내는 동시에 最小의 에너지를 사용하는 제어입력을 求하라.

이와 같이 제어문제가 定義되면, 두번째 段階는 解, 즉, 最適制御(Optimal Control)를 찾아내는 단계이고 마지막으로 이의 實際化를 피하는 것으로서 現代式 技法에서는 單純히 해석적인 과정을 통하여 설계데이터를 얻는다. 이 때 最適制御를 찾는 데는 Pontryagin의 Maximum Principle 등을 사용하는 수리적인 방법과 Steepest Descent Method 등의 직접적 방법 등을 이용할 수 있다.

古典的 설계방법과 비교하여, 現代式 方法이 우월한 것은 (i) 多入力-多出力 시스템 및 Time-Varying System의 설계가 可能하고, (ii) 설계데이터는 직접 시간 영역의 값으로 주어지며, 또 最適値라는 것, 그리고 (iii) 해석적인 方法이라는 것으로 알 수 있겠다. 또한 고전적 방법에서는 入力 및 出力의 관계만을 알 수 있는 傳達函數(Transfer Function)로 시스템을 記術하는데 비해, 現代式 方法에서는 入出力端子관계 및

內部상태를 알려주는 狀態方程式으로 시스템이 기술되므로 제어시스템의 內의 상태에 대한 정보를 얻을 수 있다. 最適制御시스템의 개념이 발전하여 환경변화에 자동적으로 적응해 나갈 수 있는 Adaptive Control System의 설계가 활발히 進行되고 있음은 주목할 만하다.

그러나 現代式 設計方法에도 여러가지 제한이 있다. 즉, 실제로 시스템 설계에 참가하는 엔지니어의 立場에서 볼 때, 요구되는 設計目標(Design Objectives)를 性能係數로 나타내는 것이 특수한 경우를 제외하고 일반적으로는 대단히 어렵다는 것, 制御問題의 解를 얻기가 용이하지 않을 뿐더러, 解를 求했다 하더라도 많은 경우 일단 Open-loop의 解로 얻어지므로, Feedback System Design이 어렵다는 점등을 들 수 있다.

3. 제어工學의 最近傾向

制御시스템의 現代式 設計方法을 解析的 方法이라고 규정하였는데, 실제로 지난 10여년 간에 걸친 制御理論의 發展속도는 그의 應用속도를 훨씬 능가해온 형편으로, 설계 현장을 취급하는 콘트롤 엔지니어들로부터 이 방법이 별로 환영을 받지 못하였다. 制御理論이 높은 수준의 數學的 用語로 쓰여져 난해하고, 또 最適制御入력을 재래식의 Analog Device로는 實現化하기가 곤란한 경우가 많다.

그런데, 1970년 이후, LSI를 기반으로한 Microprocessor-Microcomputer 등의 出現으로 制御工學分野全般에 걸쳐 一大 轉換期가 到來한 것으로 보인다. 그동안 Frequency-domain technique 및 Time-domain technique이 各各 1935년~1955년 및 1955년~1975년 기간동안 우세했다면, 앞으로의 제어공학에서는 小型 컴퓨터를 사용하는 기술이 우세할 것이다.

물론 컴퓨터가 제어시스템의 일부로서 쓰여온 것은 그 역사가 오래지만, 그 수는 극소수에 불과하였다. 그리고 예전에는 전체시스템의 관리 및 감독을 목적으로 컴퓨터를 사용하는 경우가 많았다. 그러나 요즘에는 Direct Digital Control, Distributed Computer Control 등의 방법을 기용하여, 산업工程의 必要한 부분마다 직접 현장에 이 Microcomputer-based Control를 사용하여 시스템을 제어하는 것이다. 이렇게 함으로써, 제어장치의 설비가 간단해지고 경제적이며, 제어의 質이 향상되기 때문이다. 실로, 염가이며 신뢰도가 높은 小型컴퓨터를 사용한 자동제어시스템의 應用分野는 無限大라해서 너무 지나친 말이 아닐 것이다

4. 遲延시스템(Time-delay System)에 관하여

狀態情報(State Information)가 相對的으로 긴 거리를 운행하는 경우, 제어시스템의 상태변화율이 과거 일정시간 以前에 일어난 狀態의 영향을 계속적으로 받는 경우가 있다. 이런 현상은 화학공정이나 기계공정 등에서 많이 볼 수 있는데, 이는 出力을 感知하여 電氣의 또는 다른 형태의 신호로 바꾸는 轉換器(Transducer)가 있는 부분과 入力제어 신호가 얻어지는 Controller와의 사이가 物理的인 이유로 떨어져 있기 때문에 생긴다. 이러한 시스템은 在來式的 제어방법으로 制御하면 원하지 않는 發振現象(Oscillation)이 일어나고 심지어 不安定한 상태에 이르러 시스템이 파괴되는 수도 있다. 遲延현상이 있는 것으로, 공정제어시스템(Process Control Systems)외에도, 사회및 경제적 시스템(Social and Economic System), 생물적 시스템(Biological System) 등에서도 이와 비슷한 현상을 관찰할 수 있어 요즈음은 이들을 통틀어 滯留유성이 있는 시스템(System with After-effect)이니, 혹은 유전적 시스템(Hereditary System)이라 명칭하고 많은 연구가 진행되고 있다. 이 절에서는 이러한 시스템의 제어문제에 대하여 간단히 검토하기로 한다.

가장 간단한 遲延시스템의 수학적 모델로는 보통 다음과 같은 Delay-differential Equation으로 표시된다.

$$\dot{x}(t) = f(x(t), x(t-h), u(t), t)$$

여기서 관례대로 $x(t) = (x^1(t), x^2(t), \dots, x^n(t))$ 는 n 차원의 상태변수(State variable), $u(t) = (u^1(t), u^2(t), \dots, u^m(t))$ 는 m 次元의 제어변수(Control Variable), 그리고 $h > 0$ 는 遲延시간(Delay Time)을 나타낸다. 이 방정식에서 볼 수 있듯이, 현재의 상태 변화율 $\dot{x}(t) = \frac{dx(t)}{dt}$ 가 현재상태인 $x(t)$ 와 지연시간 h 이전의 상태인 $x(t-h)$ 의 함수로 주어져 있다. 이러한 遲延시스템의 初期조건으로는 반드시 다음과 같은 형태의 함수로 표시된다. 즉,

$$x(t) = \phi(t), \quad t_0 - h \leq t \leq t_0$$

여기서 t_0 는 시스템의 動作始作時間을 나타낸다.

1970년 이전의 文獻에는 대부분, 목표상태(Target

State)를 보통의 지연시간이 없는 시스템에서와 같이 규정하여, $X(t_1) = x_1$ 과 같은 식으로 表示하고 있다. 이렇게 함으로써 제어문제가 용이하게 풀린다. 그러나 이렇게 제어된 시스템의 성능이 만족스럽지 않다는 것이 발견되었다. 예를 들어 自動調節장치(Automatic Regulator)의 목표는, 시스템이 평형상태 $X = 0$ 로 부터 이탈되었을 때 제어입력을 써서 자동적으로 이 평형상태로 되돌아 가게 하는 것인데, 만약 제어입력 $u(t)$ 를 찾아서 어떤 순간 $t = t_1$ 에 $X(t_1) = 0$ 로 목표상태에 도달했다고 하더라도 시스템이 시간 $t = t_1$ 이 후에 이 평형상태를 유지하리라는 보장이 없다. 오히려 지연시스템의 특성인 $x(t-h)$ 로 인한 후유(After-effect) 때문에 곧 평형이 깨지고 자동조절 장치의 구실을 못하게 되는 것이다.

이러한 지연시스템을 제어하기 위하여는, 소위 시스템의 상태(System State)를 단순히 n -vector인 x 로 정의할 것이 아니라, 초기조건과 같은 함수로 정의하여야 된다는 사실이 밝혀졌다. 예를 들어 Regulator의 제어문제에 있어서 가령 목표상태를

$$x(t) = 0, \quad t_1 - h \leq t \leq t_1$$

으로 정의하고 문제를 풀면, 이렇게 얻어진 제어입력은 시스템을 평형상태로 계속하여 유지한다.

지연시스템이 보통의 시스템과 다른 성질은 이외에도 많이 있는 것으로 알려졌다. 이러한 지연시스템의 제어문제는 다루기가 어렵기 때문에 많은 관심을 모으고 있는 것 같다. 한가지 매우 재미 있는 현상을 첨가하자면, 遲延素子が 없는 보통의 시스템을 제어하는데 그의 Feedback-loop에 遲延素子를 첨가하여 Overshoot, Settling time 등의 시스템 성능을 현저하게 개선할 수 있음이 실현적으로 알려지고 있다는 사실이다.

5. 맺는 말

본란을 통하여, 制御工學의 過去—現在를 設計技法의 立場에서 간단히 고찰하고, 小型컴퓨터가 制御시스템의 一部로 되고 있는 현재의 추세에 대하여 언급 하였다. 그리고 마지막으로 遲延시스템에 대한 제어문제를 소개하였다.