

제어이론 개요

권욱현 / 이준화

서울대학교 공과대학 전기공학부 / 서울시립대학교 공과대학 제어계측공학과

1. 서론

제어이론은 그 내용이 방대하기 때문에 모든 분야의 내용을 자세히 설명하기는 어렵다. 본고에서는 제어이론의 여러 분야 중에서, 실제로 많이 사용되는 전통적인 궤환 제어이론에 대하여 주로 설명하였다. 따라서 최근에 많은 연구가 진행되고 있는 지능제어 분야에 대하여는 자세히 설명하지 않았다. 또한 제어이론의 자세한 내용을 설명하는 대신에 제어이론이 나타나게 된 배경 및 특징만을 개념적으로 쉽게 설명하였다.

‘제어’라는 단어가 딱딱한 느낌을 주며, 우리의 생활과는 동떨어진 학문분야처럼 느껴지지만, 넓은 의미에서의 제어는 공학의 모든 분야 뿐 아니라, 우리의 일상 생활에 사용되고 있다. 단지 우리가 인식하지 않고 살고 있을 뿐이다. ‘제어’는 영어로 ‘control’이며 ‘조종’이라고 번역할 수 있고, 실제로 제어는 조종과 같은 의미이다. 자동차를 조종하고, 공장을 조종하고, 경제를 조종하고, 사회를 조종하는 모든 일들이 바로 제어행위이며, 이때 자동차, 공장, 경제, 사회를 조종하는 것을 제어기라고 한다. 예를 들어 자동차를 조종하는 사람은 제어기에 해당하며 자동차는 제어대상이 된다. 비슷하게 우리를 둘러싼 대부분의 것들은 모두 조종을 받는 제어대상과 조종을 하는 제어기로 생각할 수 있다. 그러나, 좁은 의미에서의 제어는 전기장치 및 기계장치에 의해 조종되는 것을 의미한다.

이러한 제어의 개념이 처음으로 나타난 것은 기원전 300년 그리스에서 고안된 수위 조절기이다. 이것은 물의 수위를 일정하게 유지하는 장치로서, 물방울이 일정한 속도로 떨어지게 해서 시간을 측정하는 물시계를 만드는 데 사용되었다. 또한 드레블(Drebble, 1572~1734)의 온도조절기,

파핀(Papin, 1647~1712)의 수증기 보일러 압력 조절기에서도 제어의 개념을 찾아 볼 수 있다.

산업적으로 사용된 최초의 제어기는 1782년 수증기 엔진의 속도를 조절하는 데 사용된 제임스 와트(James Watt)의 조속기(flyball governor)이다. 이 장치는 출력 회전축의 속도에 따라 수증기의 양을 조절하도록 만들어진 것이다. 이후에 많은 제어기들이 직관에 의해 개발되고 사용되었다. 제어기에 대한 수학적 해석은 1868년 제임스 클러크 맥스웰(James Clerk Maxwell)에 의해서 처음 시작되었다.

1920년대에는 벨 연구소(Bell Telephone Laboratories)에서 보테(Bode), 나이퀴스트(Nyquist) 등이 주파수 영역에서 시스템을 해석하는 이론을 개발하였다. 1922년에 미노스키(Minorsky)는 선박의 조향장치를 위한 자동제어기를 연구하였다. 제2차 세계대전중에 항공기 제어, 총포위치 제어, 레이더 제어 등의 군사목적을 위하여 제임스(James), 니콜스(Nichols), 필립스(Phillips) 등이 많은 제어이론을 개발하였으며, 이러한 이론들은 그후 20여년 동안 많은 분야에서 실제적인 문제를 해결하는 데 사용되었다. 1960년대에는 우주선의 유도제어와 관련하여 제어공학이 많은 발전을 하였으며, 현재 사용되는 모든 로켓, 우주선, 항공기들의 비행은 모두 자동제어 장치에 의존하고 있다.

현재에는 이러한 제어이론이 오펜기 및 냉방기의 자동온도 조절 기능, 콤팩트 디스크의 모터 제어 등 실생활에도 사용되며, 석유, 화학 공장 등의 공정제어에 응용되어 경제적이고, 고품질의 상품을 생산하는 데 기여하고 있다. 본고에서는 이러한 제어이론의 여러분야 및 최근의 연구동향에 대하여 간략히 소개할 것이다.

2. 본 론

2.1 제어시스템

제어이론은 시스템으로부터 시작한다. 시스템은 그림 1과 같이 입력과 출력이 있다. 입력은 시스템에 영향을 주는 요소이며, 출력은 시스템의 상태를 반영하는 것으로서 일반적으로 관측이 가능한 양을 의미한다.

우리가 알고 있는 대부분의 것들은 모두 입력과 출력이 있는 시스템으로 표현할 수 있다. 예를 들어서 자동차는 하나의 시스템이며 자동차에 영향을 주는 입력으로서는 핸들의 조작, 브레이크 및 엑셀의 조작, 기어의 조작 등이 있으며 자동차의 속도, 자동차의 위치 등은 시스템의 상태를 반영하는 출력으로 생각할 수 있다. 인체도 하나의 시스템이며 음식과 눈, 귀 등의 감각기관으로 들어오는 정보들은 입력이며, 입으로 이야기하는 모든 것들, 신체의 각 부위에서 나오는 분비물들은 시스템의 상태를 반영하는 출력으로 볼 수 있다. 우리가 살고 있는 사회의 경우도 사회를 유지하는 제도 등을 입력으로 보고 사회에서 나타나는 여러 현상을 출력으로 보면 하나의 시스템으로 생각할 수 있다.

이러한 시스템들은 모두 나름대로의 목적을 가지고 있다. 자동차의 경우에는 정해진 목적지까지 안전하게 이동하는 것이 목적이 될 수 있으며, 사람은 행복하게 사는 것이 목적이 될 수 있으며, 사회는 모든 사람들이 발전된 삶을 살 수 있도록 하는 것이 목적이 될 수 있다. 각각의 시스템들이 추구하는 목적을 이룰 수 있도록 하기 위해서는 시스템에 적당한 입력을 가해 주어야 한다. 따라서 시스템이 추구하는 목적을 달성하도록 시스템의 입력을 만들어내는 장치가 필요한데 이러한 장치를 우리는 제어기라고 부른다. 즉 제어기는 그림 2와 같이 시스템에 연결되어 시스템이 추구하는 목적을 달성하도록 도와주는 장치이다.

제어이론은 시스템이 추구하는 목적이 달성되도록 제어기를 설계하는 이론이라고 정의할 수 있다. 따라서 제어이론은 공학뿐만 아니라, 의학, 사회학 등의 모든 분야에 걸쳐서 연구되고 있다. 그러나, 공학에서의 제어이론은 대상 시스템이 전기 및 기계 장치로 구성된 경우로 한정되는 것이 보통이다. 즉 실내의 자동온도 조절, 자동조립 라인, 선반, 항법 시스템, 무기 시스템, 교통시스템, 발전 시스템, 로봇 등 의 제어방법을 연구하는 이론을 제어이론이라고 부른다.

그림 2와 같이 시스템과 제어기가 구성된 경우를 우리는 개루우프 제어시스템(open loop control system)이라고 부

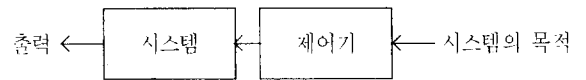


그림 2. 개루우프 제어 시스템

른다. 이러한 구성의 제어기를 사용하기 위해서는 시스템에 대한 정확한 이해가 필요하다. 즉, 어떠한 입력이 시스템에 가해질 때 시스템의 목적이 달성되는 가를 정확히 알 수 있는 경우에만 그림 2의 개루우프 제어를 사용할 수 있다. 예를 들어서 주어진 시스템이 특성을 잘 알고 있는 전동기라고 가정하자. 시스템의 입력은 전동기에 가해주는 전압이고, 시스템의 목적은 전동기의 속도를 일정하게 하는 것이라고 할 때 전동기의 속도를 일정하게 하기 위해서는 전동기에 일정한 전압을 가해주면 될 것이다. 전동기의 축에 우리가 예측할 수 있는 부하가 인가되는 경우에도 부하의 변동에 따라서 알맞은 전압을 가해주면 전동기의 속도를 일정하게 유지할 수 있다. 그러나, 전동기의 축에 우리가 예측할 수 없는 부하가 가해지는 경우를 생각해보면, 개루우프 제어기로는 더 이상 전동기의 속도를 일정하게 하는 시스템 입력을 만들 수 없다.

우리가 다루는 대부분의 시스템들은 어느 정도 특성을 알 수 있지만 정확히 알 수 있는 경우는 거의 없다. 따라서 우리가 알지 못하는 특성 때문에 개루우프 제어시스템으로 시스템의 목적을 만족시키는 것은 대부분의 경우 불가능하다. 따라서 시스템의 특성을 완벽하게 파악하지 못하는 경우에는 그림 3과 같이 시스템이 목적을 만족시키는가를 항상 살펴 보면서 시스템의 입력을 발생시키는 폐루우프 제어시스템(closed loop control system)을 구성해야 한다.

그림 3과 같은 폐루우프 제어시스템에서 시스템의 출력은 시스템의 목적이 만족되었는가를 알 수 있는 정보를 가지고 있어야 한다. 폐루우프 제어시스템에서 제어기는 시스템의 출력을 관찰하면서 시스템이 목적을 만족하도록 시스템의 입력을 만들게 된다. 예를 들어 예측하지 못하는 부하가 있는 전동기의 속도를 제어하는 경우에 시스템의 출력인 전동기의 속도를 제어기가 관측하여, 전동기의 속도가 감소하게 되면 전동기에 가해주는 전압을 증가시키고, 전동기의 속도가 증가하면 전동기에 가해주는 전압을 감소시켜서, 전동기의 속도를 일정하게 만드는 제어기를 구성할 수 있다. 이러한 폐루우프 제어시스템은 궤환 제어시스템(feedback control system)이라고도 부른다. 그림 3과 같은 궤환 제어시스템의 제어기를 설계하기 위한 제어이론은 우리가 알지 못

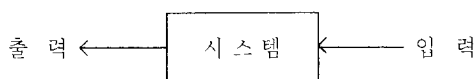


그림 1. 시스템의 블록도 표현

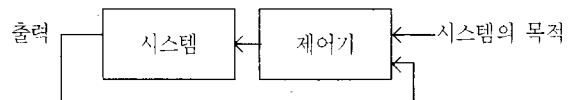


그림 3. 폐루우프 제어시스템

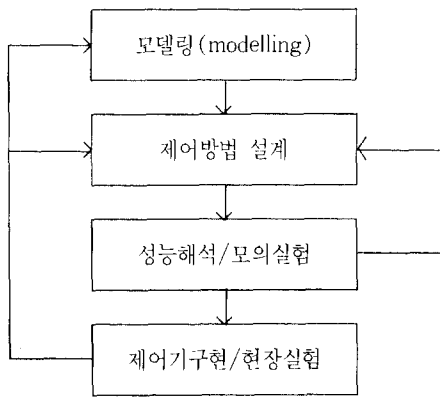


그림 4. 제어기 설계절차

하는 시스템의 특성 및 그 해결방법에 따라서 여러 가지 방향으로 발전해 왔다.

개루우프 제어시스템 및 폐루우프 제어시스템을 구성하는 제어기를 설계하기 위해서는 몇가지 단계를 거치게 된다. 그림 4에 제어기를 설계하는 절차를 간략히 나타내었다.

제어기를 설계하기 위해서는 먼저 대상시스템을 다루기 쉬운 방법으로 표현해야 한다. 주로 수학적인 방법을 사용하여 시스템을 표현하게 되는데, 특별한 시스템의 경우에는 논리적인 문장이나, 그림을 사용하여 시스템을 표현하기도 한다. 제어기는 이러한 모델과 시스템의 목적을 기초로 하여 설계 하게 된다. 설계된 제어기가 원하는 목적을 만족하는가를 알아보는 성능해석은 해석적인 방법 및 컴퓨터 모의 실험(simulation)을 통하여 하게 된다. 특히 시스템의 모델 및 시스템의 목적이 해석적인 방법에 의해 나타나지 않는 경우에는 컴퓨터 모의 실험을 통한 성능해석이 중요하게 된다. 성능해석 및 모의실험을 통하여 제어기의 성능이 입증되면 하드웨어 및 소프트웨어를 사용하여 제어기를 구현하게 된다. 그러나, 성능해석 및 모의실험 결과 시스템의 목적이 만족되지 않는다면, 제어기를 다시 설계하여야 한다.

고전적인 제어기는 공압압 기계장치 및 아날로그 소자를 사용한 전기회로를 사용하여 제어기를 구현했지만, 최근에 빠른속도로 발전한 컴퓨터공학은 센서(sensor) 및 구동기(actuator)를 제외한 제어기의 대부분을 디지털 시스템으로 구현할 수 있게 해준다. 이러한 제어기를 현장에 설치하여 실제 시스템의 목적에 맞게 제어기가 동작하지 않는다면 제어기를 다시 설계하거나, 모델링 단계부터 다시 시작해야 한다. 이와 같이 제어기의 설계과정에는 여러번의 시행착오가 있을 수 있다.

제어이론은 시스템의 모델링 방법뿐만 아니라 제어목적에 따라서 여러 가지로 분류될 수 있다. 2.2 절에서는 시스템의 모델링 방법에 따라서 구별되는 제어이론들에 대해서 설명하며, 제어목적에 따른 제어이론의 분류는 2.3 절에 설명하였다.

2.2 모델링과 관련된 제어이론

제어기를 설계하기 위해서는 먼저 시스템을 우리가 다룰 수 있는 형태로 표현해야 한다. 이 과정을 모델링 과정이라고 부른다. 공학에서 다루는 시스템들은 대부분 전기 및 기계 시스템이며 따라서 수학적인 방법으로 모델링 하게 된다. 시스템을 수학적인 모델로 나타내는 방법에는 크게 두 가지 방법이 있다. 하나는 상태변수 영역에서 나타내는 것이며, 또 하나는 주파수 영역에서 입출력 전달함수로 나타내는 것이다. 상태변수 영역에서 시스템을 모델링하는 것은 시스템의 물리적인 특성을 미분방정식 또는 차분방정식을 사용하여 나타내는 것으로서 많은 시스템들이 상태변수 영역에서 나타내진다. 상태변수 영역에서 표시된 모델은 다시 선형시스템과 비선형 시스템으로 나뉘어지며, 모델에 따라서 선형시스템 이론, 비선형시스템 이론이 연구된다. 주파수 영역에서 입출력 전달함수로 표시되는 시스템은 시불변 선형시스템의 경우이며 고전적인 제어이론에서 주로 사용하였다. 모델링 과정은 제어기를 설계하는 과정 중에서 가장 중요한 과정이며, 모델링이 정확할수록 원하는 목적을 달성하는 제어기를 설계할 가능성이 높아진다. 그러나, 시스템에는 항상 우리가 모델링하지 못하는 부분이 존재하며, 이러한 부분들이 제어기설계에 어려움을 주게된다.

모델링 단계에서 시스템에는 존재하지만 수식으로 표현하지 못하는 부분들은 불확실성이라고 불리며 이러한 불확실성도 모델링 단계에서 그 형태와 특성을 가정해야 한다. 예를 들어서 전동기 시스템의 속도를 측정하기 위하여 속도계를 사용하는 경우에 전동기가 같은 속도로 회전하고 있어도 속도계의 값이 일정한 값에서 어느 정도 변하게 되는데 이러한 현상은 수식으로 모델링되지 않는다. 일반적으로 이러한 현상은 확률분포를 갖는 측정잡음에 의한 것으로 생각한다. 또한 예측할 수 없는 전동기 부하의 경우는 크기가 제한된 외란으로 가정하고 시스템을 모델링하게 된다.

결과적으로 그림 5와 같은 시스템 모델을 얻게 된다. 그림 5와 같은 형태의 모델은 지금까지 가장 많이 사용되는 시스템 모델이다. 잡음이나 외란을 모델에 가정한 것은 수식적인 모델이 시스템을 정확히 표현하지 못하기 때문이다. 따라서 잡음과 외란에 대한 가정이 실제 시스템을 정확히 표현하게 되는지는 실험을 통하여 다시 검증되어야 한다. 그림 5의 모델은 시스템을 표현하는 한가지 방법이며 모든 시스템이 그림 5와 같은 방법으로 표시되는 것은 아니다. 또한 측정잡음과 외란에 대한 표현 방법도 여러 가지가 있을

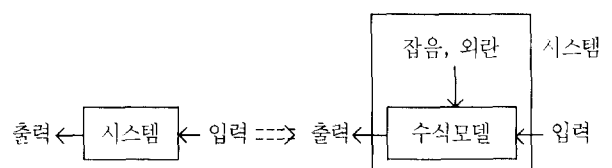


그림 5. 시스템의 모델링 I

수 있으며, 그러한 표현 방법 중에서 실제 시스템에 가장 근접한 것을 찾아내는 것이 불가능할 수도 있다.

그림 5와 같은 형태의 시스템 모델에서 잡음 및 외란을 백색 잡음(white noise)으로 가정하고 제어기를 구하는 이론은 H_2 이론 및 IQG 이론을 포함하는 WHK(Wiener-Hopf-Kalman) 이론으로서 1950년대에 미국과 구 소련이 우주개발 경쟁을 할 때 우주선의 유도 및 항법제어에 사용하여 큰 성공을 보았다. 우주선은 특성이 포탄과 근본적으로 같아서 거의 정확한 모델링이 가능하고, 모델링되지 못한 부분은 백색 잡음으로서 잘 표현되었기 때문이다. 그러나 우주선의 제어에서 성공한 WHK 이론이 공장에서의 제어문제에는 잘 적용되지 못하였다. 그것은 공장의 모델은 우주선과는 달리 그 불확실성을 단지 측정잡음이나, 외란으로 표시할 수 없기 때문이다. 즉, 그림 5의 모델은 시스템의 불확실한 부분을 포함하는 모델링 방법의 하나이며, 모든 시스템을 그림 5와 같은 모델로 나타낼 수는 없는 것이다.

고전적인 제어기 설계 방법에서는 시스템을 그림 6과 같이 모델링 하였다. 그림 6에서 $Ke^{j\theta}$ 는 시스템에서 모델링 되지 못한 불확실성을 나타내며, K는 1근치의 값을 의미하고, θ 는 0 근치의 값을 의미한다. $Ke^{j\theta}$ 는 앞서 그림 5에서 모델링되지 못한 부분을 잡음 및 외란으로 표시한 것에 대응되는 것이다. 고전적인 제어기 설계 방법에서는 K와 θ 값의 여유를 크게 함으로써 모델링 되지 못한 부분을 보상하는 제어기를 설계하였다.

K의 범위는 이득여유(gain margin), θ 의 범위는 위상여유(phase margin)로 불리며 이득여유와 위상여유를 크게 하는 제어기를 설계하는 것이 고전적인 제어기 설계 방법이다. 이득여유와 위상여유를 크게 하기 위하여 진상(phase lead) 보상기, 지상(phase lag) 보상기 등이 PID 제어기와 같이 사용되었고, 보데 플롯(Bode plot), 나이퀴스트 플롯(Nyquist plot), 루트 로커스(root locus) 방법들이 제어기 설계에 사용되었다.

그림 5의 시스템 모델과 그림 6의 시스템 모델은 시스템에서 불확실성을 표현하는 방법에서 많은 차이를 보인다. 두 가지 시스템 모델 중 어떠한 것이 실제 시스템을 적절하게 표시하는가 하는 것은 시스템마다 다르다. 그림 6과 같이 불확실성이 모델에 직렬로 연결되어 있음을 가정하고 구한 제어기는 실제 산업현장에서 잘 사용되고 있고, 그림 5와 같이 시스템을 가정한 경우에 구한 제어기는 우주선의 제어에 잘 적용되고 있다. 따라서 시스템을 그림 5 또는 그림 6으로 표현하는 것보다는 두가지를 결합하여 그림 7과

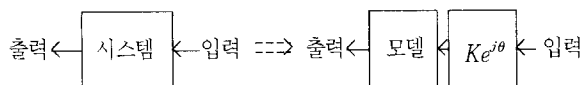


그림 6. 시스템의 모델링 II

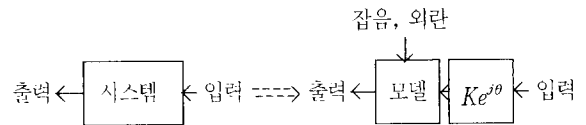


그림 7. 시스템의 모델링 III

같이 불확실성과 잡음이 같이 있는 형태로 표현한다면 실제 시스템을 잘 나타낼 수 있을 것이다.

그림 7과 같이 시스템을 표시하고 이득여유 및 위상여유를 크게 하는 제어기를 설계하는 이론이 1980년대 초에 나타난 LQG/LTR 이론이다. LQG/LTR 이론은 WHK 이론을 보완하여 시스템내의 불확실성을 다룰 수 있도록 한 이론이다. LQG/LTR 이론의 경우에는 $Ke^{j\theta}$ 를 일반화시켜서 $|G(w)| < l(w)$ 형태의 불확실성을 다룰 수 있도록 하였다.

그림 5의 시스템 표현에서 측정잡음이나 외란을 확률적인(stochastic) 백색 잡음으로 가정하는 대신에 결정적인(deterministic) 유한 에너지 신호로 가정함으로써 시스템을 잘 나타낼 수 있는 경우가 있다. 이와같은 가정에서 제어기를 설계하는 이론이 1980년대 초부터 활발히 연구된 H_∞ 제어이론이다. 외란 및 잡음을 결정적인 신호로 가정하는 경우에 얻어지는 제어기는 모델링되지 못한 시스템의 불확실성에 대하여 강한 성능을 보이기 때문에 H_∞ 제어이론은 강인제어 이론으로 잘 알려져 있다.

모델링 과정에서 발생하는 불확실성은 크게 두가지로 생각할 수 있다. 하나는 알 수 없는 외부 입력이고 또 하나는 시스템에서 모델링되지 못한 부분이다. 잡음 및 외란은 알 수 없는 외부 입력에 해당하며, $Ke^{j\theta}$ 는 모델링 되지 못한 부분에 해당한다. 모델식을 M, 알 수 없는 외부 입력을 d, 모델링 되지 못한 부분을 Δ 로 표시하면, 시스템은 그림 8과 같이 일반화되어 표현될 수 있다.

그림 7에서 $F(M, \Delta)$ 의 표현은 수식으로 표현된 모델 M과 Δ 와의 특정한 결합에 의해서 시스템이 표현됨을 의미하며, 시스템마다 다른 형태를 취하게 된다. 그림 7의 시스템 표현에서 d, Δ , F는 정확히 알 수 없는 것들이며 제어기를 설계하기 위하여 우리가 가정해야 할 것들이다. d, Δ , F의 가정에 따라서 여러 가지 제어이론들이 연구되는 것이다.

그림 8과 같은 시스템 표현을 사용하면, WHK 이론은 Δ

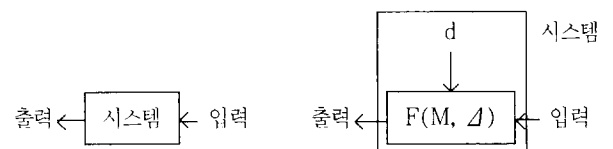


그림 8. 시스템의 모델링 IV

$=0$, $F(M, \Delta) = M$, d 를 백색 잡음으로 가정하고 제어를 구하는 이론이며, 고전적인 제어이론은 $d=0$, $\Delta = Ke^{j\omega}$, $F(M, \Delta) = M\Delta$ 의 형태를 가정하고 Δ 의 허용가능한 범위를 크게 하는 제어를 구하는 이론이다. H_∞ 이론은 $\Delta=0$, $F(M, \Delta) = M$, d 를 유한에너지 신호로 가정하고 제어를 구하는 이론이다.

제어이론은 불확실성 d , Δ 와 F 의 가정에 따라서 분류될 수 있다. 또한 가정된 불확실성을 어떠한 방법으로 극복하느냐 하는 것에 따라서도 제어이론이 달라지게 된다. 불확실성을 극복하는 방법으로 두 가지 방법을 생각할 수 있다. 하나는 제어를 잘 설계하여 불확실성이 시스템의 목적달성에 최소의 영향을 주도록 하는 수동적인 방법이며, 또 하나는 시스템의 정확한 모델식을 찾아내어 그에 맞는 제어를 설계하는 능동적인 방법이다. 첫 번째 방법은 전통적인 제어기 설계이론에 해당하며, 두 번째 방법은 적응 제어이론(adaptive control theory) 또는 학습 제어이론(learning control theory)에 해당하며 1950년대 이후에 많은 연구가 이루어지고 있는 분야이다. 또한 모델식에 불확실성을 가정한 상태에서 모델식을 찾아 제어하는 방법은 강인 적응제어이론(robust adaptive control theory)으로 연구되고 있다.

2.3 시스템의 목적에 따른 제어이론

시스템의 목적은 주어지는 시스템마다 다르며, 시스템의 목적을 일반화시켜 표현하기는 쉽지 않다. 그러나 제어기의 기능은 시스템의 목적이 달성되도록 도와주는 장치이므로 시스템의 목적으로 설정된 값은 제어기에 대한 하나의 명령이 될 수 있고, 제어의 목적은 다음과 같이 기술될 수 있다.

제어의 목적: 어떤 조건하에서도 명령 추종 능력이 우수하다.

여기서 명령이 어떻게 표현되는가 하는 것은 시스템에 의존하는 것이며, 일반적인 표현 방법은 없다. 예를 들어서 전동기 시스템의 경우 원하는 속도가 제어기에 대한 명령이 될 수 있으며, 사람이 운전하는 자동차의 경우 목적지가 운전자에 대한 명령이 될 수 있으며, 사회 시스템의 경우 사회의 안정이 사회를 제어하는 기구에 대한 명령이 될 수 있다.

특히 공학적인 시스템의 경우에는 시스템의 입력 및 출력이 수치로 표시된다. 또한 공학적인 시스템의 경우 원하는 시스템의 출력이 시스템의 목적을 반영하는 경우가 많기 때문에, 많은 경우 시스템의 목적을 시스템의 출력값으로 기술한다. 즉, 그림 1 및 그림 2의 제어시스템에서 시스템의 목적, 입력, 출력이 모두 수치로 나타난다. 시스템의 목적을 r , 입력을 u , 출력을 y 로 표시하고, 그림 8의 시스템 표현을 사용하여 제어시스템을 구성하면 그림 9를 얻는다.

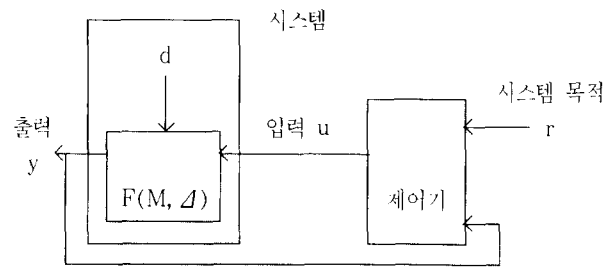


그림 9. 제한 제어 시스템의 구성

(시스템의 모델이 정확치 않은 경우에는 제한제어 시스템을 사용해야 한다.)

그림 9와 같이 제한제어 시스템을 구성하고 제어기가 명령을 잘 추종하기 위해서는 다음과 같은 세부적인 제어목적이 만족되어야 한다.

- * 전체 시스템이 안정하게 동작되어야 한다.
- * 출력값과 명령값의 차이가 작아야 한다.
- * 알 수 없는 외란 및 잡음의 외부 입력 d 가 출력에 미치는 영향이 작아야 한다.
- * 모델링되지 못한 불확실성 Δ 가 출력에 미치는 영향이 작아야 한다.

전체 시스템이 안정하게 동작해야 한다는 제어목적은 모든 제어기가 만족해야 할 가장 기본적인 목적이다. 전체시스템이 안정되게 동작하지 않는다면 시스템을 사용할 수 없기 때문이다. 1960년대 및 1970년대에 이루어진 선형시스템의 가제어성(controllability), 가관측성(observability), 안정성(stability)에 대한 연구는 상태변수 영역에서 표시된 시스템뿐만 아니라 주파수 영역에서 입출력 모델로 표시된 시스템에 대한 안정도 해석 및 안정화 가능성에 대한 많은 유용한 이론을 제공하고 있다.

출력값과 명령값과의 차이가 작아야 한다는 것은 근본적인 제어기의 목적이며, 고전적인 제어이론에서는 이러한 목적을 상승시간(rise time), 최대오버슈트(maximum overshoot), 정착시간(settling time), 정상상태 오차(steady state error) 등으로 표현하였다. 시스템을 상태변수영역에서 표시하는 현대 제어이론이 나오면서 이러한 목적은 식 (1)과 같이 명령과 출력의 오차($r-y$)의 에너지로 표현되었다.

$$J = \int_0^T (r-y)^2 Q(r-y) dt \quad (1)$$

식 (1)의 값은 출력과 명령의 차이를 나타내는 한 가지 방법으로서 J 의 값이 작아지면 분명히 출력값과 명령값의 차이가 작게 된다. J 의 값을 최소로 하는 제어를 구하는 이론은 최적 제어이론(optimal control theory)로 1950년대에 시작되어 지금까지 많이 연구되는 분야이다. 최적 제

이이론의 단점은 출력과 명령의 차이를 전역에서 줄이려고 하기 때문에 과도기적인 특성이 반영되기 어렵다는 것이다. 이러한 문제점은 J 를 계산할 때 사용하는 무게행렬 Q 를 잘 선택함으로써 해결할 수도 있지만, 시행착오적인 방법으로 Q 를 결정하게 된다.

출력과 명령의 차이를 표현하는 방법은 이밖에도 여러 가지가 있을 수 있으며, 대부분 식 (2)와 같이 노름(norm) 표시방법을 사용한다.

$$J_p = \| r - y \|_p \quad (2)$$

식 (1)은 $p=2$ 인 경우로 생각할 수 있으며, 1980년대 중반에 $p=\infty$ 인 경우가 연구되었으며 이 경우 J_∞ 값을 최소화 하는 이론을 L_∞ 이론이라고 부르며, 최근에 많은 연구가 진행되는 제어이론 분야이다. J_p 의 값을 최소화하는 것이 목적인 경우에 이러한 목적을 만족하는 제어기를 구하는 이론이 최적제어이론이지만 이러한 최적제어이론은 궤환제어기를 구하는 하나의 수단으로 자주 사용된다.

알 수 없는 외부입력 d 가 출력에 미치는 영향이 작아야 한다는 제어목적은 만족시키는 제어기는 d 에 대한 가정에 따라서 여러 가지로 나누어진다. 1950년대에 나타난 WHK 이론은 d 를 백색 잡음으로 가정하였으며 이러한 백색 잡음이 출력에 미치는 영향을 줄이기 위하여 제어기를 구하였다. 시스템을 주파수 영역에서 표시하는 경우에 제어기를 구하는 방법은 H_2 이론으로 알려져 있으며, 시스템을 상태변수 영역에서 표시하고 제어기를 구하는 방법은 IQG 이론으로 잘 알려져 있다. 외부입력 d 를 백색 잡음으로 가정하는 것은 많은 시스템에 잘 적용되었지만 이들 이론은 모델링 되지 못한 불확실성 Δ 의 영향을 고려하지 못한다는 단점이 있다. 이를 보완하기 위하여 1980년대 초에 LQG/LTR 이론이 등장했고 강인성을 보장하는 IQG 이론들이 최근 연구되고 있다.

알 수 없는 외부 입력 d 를 백색잡음으로 가정하는 것이 모든 시스템에 잘 적용되는 것은 아니다. 1980년대 초에 나타난 H_∞ 제어이론은 d 를 백색잡음으로 가정하는 대신 유한 에너지 신호로 가정했다. 유한 에너지 신호 d 가 출력에 미치는 영향을 식 (3)과 같이 나타내고 J_{H_∞} 값을 최소화 하는 제어기를 구하는 것이 H_∞ 제어이론이다.

$$J_{H_\infty} = \sup_{d \neq 0, \|d\| \leq 1} \frac{\|y\|}{\|d\|} \quad (3)$$

실제로 시스템이 시불변 선형 시스템인 경우에는 J_{H_∞} 값은 d 에서 y 로 가는 전달함수의 H_∞ 노름이며 H_∞ 제어기는 H_∞ 노름을 최소화하는 제어기이다. H_∞ 제어기는 결정

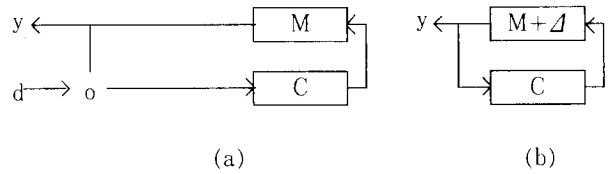


그림 10. 두 개의 궤환제어 시스템

적인 외란 d 에 대한 응답을 개선하지만 또한, Δ 가 존재하는 경우에도 시스템의 안정도를 보장하는 제어가 됨이 잘 알려져 있다. 즉, 그림 10의 (a)와 같은 궤환제어 시스템에서 d 를 유한에너지 신호로 가정하고, y 의 에너지를 최소화시키는 H_∞ 제어기 C 는 그림 10의 (b)와 같이 불확실성 Δ 가 노름(norm)유계를 갖는 경우의 안정화 제어기임이 잘 알려져 있다. 이러한 의미에서 H_∞ 제어기를 강인제어기(robust controller)라고 부른다. 또한 H_∞ 제어기의 강인 안정화 성질을 사용하여 강인제어이론이 많이 발전하였다.

모델링 되지 못한 불확실성 Δ 가 출력에 미치는 영향을 줄이기 위한 제어이론은 불확실성 Δ 를 표현하는 방법과 $F(M, \Delta)$ 의 표현 방법에 따라서 여러 가지로 나누어진다. 2.2 절에서 알아본 바와 같이 고전적인 제어이론에서는 이득 여유 및 위상여유를 증가시켜 Δ 의 영향을 줄이는 제어기를 구하였다. 그러나, 시스템의 규모가 크고 복잡해지면서 고전적인 방법으로는 불확실성에 대한 영향을 줄이기 어렵게 되었다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 강인 제어이론(robust control theory)이 상태변수 영역뿐만 아니라 주파수 영역에서 연구되어 왔다. 대표적인 이론으로는 H_∞ 제어이론, L_1 제어이론, μ 제어이론 등이 있다. 제어이론이 나타난 이후부터 지금까지 연구된 제어이론들은 모두 모델링 되지 못한 부분에 의한 문제를 해결하기 위한 강인 제어이론이지만, 특별히 모델링 되지 못한 불확실성 Δ 의 영향을 줄이는 제어기 설계이론만을 일반적으로 강인 제어이론이라고 부른다. 적응 제어이론 또한 불확실성 Δ 에 의한 문제를 해결하기 위해 개발되었지만 적응 제어이론은 불확실성 Δ 의 영향을 줄이는 대신 Δ 의 값을 찾아서 대응하는 제어입력을 만든다는 점에 있어서 강인 제어이론과 구별된다.

$F(M, \Delta)$ 의 표현방법은 시스템마다 가장 적합한 방법들이 있지만 그림 11과 같이 LFT(linear fractional transform)를 사용하여 표현하는 것이 일반적이다.

실제로 많은 제어이론에서 가정해 왔던 불확실성들이 LFT를 사용하여 표현될 수 있음이 잘 알려져 있다. $F(M, \Delta)$ 의 표현뿐만 아니라 Δ 의 표현 방법에도 따라서도 여러 가지 제어이론이 나타났다. Δ 의 구조를 가정하지 않는 경우와 Δ 의 구조를 가정하지 않는 경우로 나뉘는데 구조를 가정하지 않는 경우의 대표적인 강인 제어이론은 H_∞ 제어이론이며, μ 제어이론은 Δ 의 구조를 가정하는 대표적인 강인

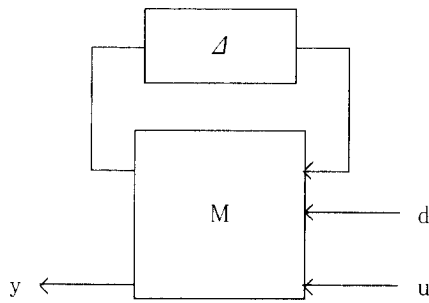


그림 11. 시스템의 LFT 표현

제어이론이다.

2.4 제어를 계산하는 방법

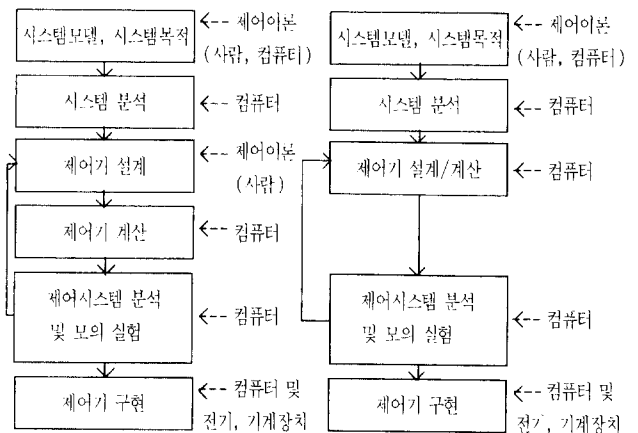
시스템의 모델 및 시스템의 목적에 따라서 여러 가지 제어이론으로 나누어지며, 각각의 제어이론은 모델 및 목적에 맞는 제어를 구하는 여러 가지 방법을 제시한다. 고전적인 제어이론에서는 PID 제어기 및 진상 보상기, 지상 보상기, 보테 플롯, 나이키스트 플롯, 근궤적 기법 등의 방법으로 제어를 구한다.

1950년대에 등장한 WHK 제어이론은 제어를 설계하는 보다 체계적인 방법을 제시하였다. H_2 제어이론은 시스템이 주파수 영역에서 표시되는 경우에는 Youla 매개변수화 (parametrization) 방법 및 보간법(interpolation)으로 시스템을 안정화시키고 백색 잡음 및 외란의 영향을 줄여주는 제어를 설계하는 방법이며, LQG 이론은 시스템의 모델이 상태 변수 영역에서 표시되는 경우 행렬의 연산을 통한 제어기 구성방법이다. 특히 상태변수 영역에서의 제어기 설계에서는 행렬로 표시된 Riccati 방정식을 풀어서 제어를 얻게 되는데 이것은 주파수 영역에서의 보간법에 해당하는 것이다.

1980년대에 등장한 H_∞ 제어이론은 H_2 제어이론과 마찬가지로 안정화 제어기의 매개변수화와 보간법을 통해서 제어를 구하고 있다. 1980년대 말에 Doyle 등에 의해서 상태변수 영역에서의 H_∞ 제어가 구해졌으며 LQG 제어이론과 비슷하게 Riccati 방정식을 풀어서 제어를 구하고 있다.

최근 발달한 컴퓨터 공학은 고전적인 제어기뿐만 아니라 WHK 제어기, H_∞ 제어기 등 거의 모든 제어를 컴퓨터를 사용하여 설계하고, 구현할 수 있도록 해준다. 주파수 영역 및 상태변수 영역에서 표시된 시스템의 특성을 컴퓨터가 계산하여 보여주며, 제어를 설계하기 위한 복잡한 계산을 컴퓨터가 대신 해주는 제어용 소프트웨어가 널리 사용되고 있다. 대표적인 소프트웨어에는 MATRIX-X, MATLAB, CTRL-C, Program CC 등이 있다.

그러나, 이러한 소프트웨어는 단지 시스템의 특성을 분석



(a) 기존방법

(b) 연구되고 있는 방법

그림 12. 컴퓨터의 활용방법

하고 제어를 구하는 계산을 도와주는 역할을 하는 것으로 실제로 컴퓨터의 능력을 최대한으로 활용한다고 보기 어렵다. 즉 현재는 그림 12의 (a)와 같은 방법으로 컴퓨터를 사용하고 있다.

현재의 컴퓨터는 단지 계산에만 사용되기 때문에 사람이 시스템의 모델과 시스템의 목적에 맞는 제어를 설계한 후에 모의실험을 통하여 만족할 만한 성능이 나타나지 않으면, 다시 제어를 설계하고 모의실험하는 시행착오를 사람이 계속 반복해야만 한다. 예를 들어서 시스템의 목적으로 상승시간, 최대 오버슈트, 정상상태 오차 등이 주어졌다고 하자. 이러한 목적을 만족시키기 위해서 제어를 설계하는 사람은 고전적인 제어이론 및 현대적인 제어이론인 LQG, H_∞ 제어이론 등을 사용하여 제어를 설계할 것이다. 즉 PID 제어기의 파라미터를 바꾸어 보기도 하고, LQG 및 H_∞ 제어이론의 설계 변수들을 바꾸어 보면서 제어가 최초의 시스템 목적을 만족하도록 시행착오적인 방법으로 제어를 설계하게 된다. 이러한 과정을 반복하게 되는 가장 근본적인 원인은 대부분의 제어기 설계방법에서 가정하는 설계목적이 원래의 시스템 목적을 간접적으로 반영하는 것이기 때문이다. 예를 들어서 식 (1) 및 식 (2)의 값을 작게 만들면 상승시간 및 최대 오버슈트, 정상상태 오차가 줄어들겠지만 식 (1)과 식 (2)가 설계 사양을 직접적으로 반영하지는 못하기 때문이다.

각각의 제어이론이 가정하는 제어기의 목적은 실제 시스템의 목적을 간접적으로 반영하여 제어를 설계하는 방법으로 사용되는 것이지 자체가 시스템의 목적은 아닌 것이다. 예를 들어 상승시간 및 최대 오버슈트를 줄이는 제어를 설계하기 위하여 최적 제어이론을 사용한다면, 최적제어이론에서 가정하는 성능지수 (1)은 목적이 아니라, 원래의 목적을 반영하는 중간 목적으로 사용 되는 것이다.

그러나, 시스템의 목적 자체를 만족하는 제어를 설계하

는 방법이 있다면 그림 12의 (b)와 같이 컴퓨터를 활용하여 쉽게 제어기를 설계할 수 있다. 예를 들어서 최적제어 이론에서 가정하는 성능지수 자체가 시스템의 목적이라면 컴퓨터를 사용하여 쉽게 제어기를 구할 수 있다. 그러나, 대부분의 경우 시스템 목적들은 기존의 제어이론에서 가정하는 설계 목적으로 표현되지는 않는다.

우리가 제어기를 설계하는 과정을 살펴보면 주어진 시스템에 대하여 시스템의 목적을 만족하는 제어기를 구하는 과정이라기 보다는 찾는 과정으로 보는 것이 적당하다. 즉 우리가 변화시킬 수 있는 여러 가지 변수 들을 바꾸면서, 심지어 제어기를 구하는 방법자체를 바꾸면서 시스템의 목적을 만족하는 제어기를 차례대로 찾아보는 것이다. 즉, 아직까지는 제어기를 찾는 알고리즘이 사람들의 직관에 굉장히 의존하고 있다. 따라서 제어기를 찾는 체계적인 방법을 연구할 필요가 있으며, 체계적인 방법이 있다면, 컴퓨터를 사용하여 쉽게 제어기를 설계할 수 있을 것이다.

1990년대 초에 나타난 LMI(linear matrix inequality) 이론은 제어기를 찾는 체계적인 방법의 하나로 볼 수 있다. LMI 이론에 의하면 시스템의 목적들이 대부분 LMI로 표시됨을 알 수 있다. 또한 LMI로 표현된 시스템 목적을 만족하는 제어기는 볼록 최적화 기법(convex optimization method)를 사용하여 컴퓨터로 계산이 가능하기 때문에 시스템 모델과 LMI로 표시되는 시스템 목적이 주어지면 제어기의 설계는 컴퓨터를 사용하여 쉽게 구해진다. LMI로 표현되지 않는 시스템 목적도 대부분의 경우 볼록 부등식(convex inequality)으로 표현되는데 이 경우에도 볼록 최적화 기법에 의해 시스템의 목적을 만족하는 제어기를 구할 수 있다. LMI 및 볼록최적화 기법을 사용한 제어기 설계 방법은 실제 상용 프로그램으로 개발되어 MATLAB 및 MATRIX-X에서 사용되고 있다.

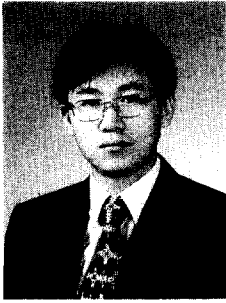
3. 결 론

본 고에서는 광범위한 제어이론 중에서 특히 전통적인 변환제어이론에 대하여 개괄적인 내용을 다루었다. 제어이론의 근본적인 문제는 불확실성이 있는 시스템 모델에서 시스

템의 목적을 만족하는 제어기를 설계하는 것이다. 시스템의 불확실성을 가정하는 방법과 해결하는 방법에 따라서 다양한 제어이론들이 나타났으며, 또한 시스템의 목적에 따라서 서로 다른 제어이론들이 나타났다. 따라서 어떠한 제어이론도 모든 시스템에 대하여 좋은 제어기를 설계하지는 못하며, 제어이론이 출발한 가정에 맞는 시스템 및 시스템 목적에 맞는 경우에 제어이론은 좋은 제어기를 설계하게 된다. 이러한 제어이론은 최근 발달한 컴퓨터 공학과 결합되어 제어기를 빠르고 정확하게 찾으려는 방향으로 발전하고 있다.

참 고 문 헌

- [1] "Challenges to control : a collective view," *IEEE Trans. Automat. Contr.* vol. AC-32, no. 4, pp 275-285, April 1987.
- [2] K. M. Passino, "Bridging the gap between conventional and intelligent control," *IEEE Control Systems*, vol. 13, no. 3, pp.12-18, June 1993.
- [3] B. C. Kuo, *Automatic control systems*, Prentice-Hall, Inc., 1982.
- [4] S. P. Boyd and C. H. Barratt, *Linear controller design*, Prentice-Hall, Inc., 1991.
- [5] M. Green and D. J. N. Limbeer, *Linear robust control*, Prentice-Hall, Inc., 1995.
- [6] K. J. Astrom and B. Wittenmark, *Adaptive control*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989.
- [7] M. M. Gupta and D. H. Rao, *Neuro-control systems*, IEEE Press, 1993.
- [8] J. M. Maciejowski, *Multivariable feedback design*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989.
- [9] T. Kailath, *Linear systems*, Prentice-Hall, Inc., 1980.
- [10] A. Benveniste and K. J. Astrom, "Meeting the challenge of computer science in the industrial applications of control : an inductory discussion to the special issue," *IEEE Trans. Automat. Contr.* vol. AC-38, no. 7, pp 1004-1010, July 1993.



이 준 화

1987, 1989, 1994년에 서울대학교에서 제어계측공학 학사, 석사, 박사 학위를 받았다.

1991년 7월부터 1994년 9월까지 서울대학교 제어계측 신기술 연구센터 연구원으로 있었으며, 1994년 10월부터 3개월간 미국 Caltech에

서 연구원으로 있었고, 1995년 3월부터 서울시립대학교 제어계측공학과 전임강사로 있음.

주요 관심 분야는 강인제어, 예측제어, 이산현상 시스템, 컴퓨터 제어 시스템이다.



권 옥 현

1966년, 1972년에 서울대학교에서 전기공학 학사 및 석사학위를 받고 1975년 미국 Brown 대학에서 제어 이론으로 박사학위를 받았다.

1975년부터 1976년까지 Brown대학의 연구조교로 있었으며, 1976년부터 1977년까지 Iowa대학의 조교

수로 있었다.

1977년에 서울대학교에 임용되어 현재는 정교수이다.

1981년 1월부터 1982년 1월까지 Stanford 대학의 방문 교수로 있었다.

현재 연구분야는 다변수 강인제어, 예측제어, 이산현상 시스템, 네트워크 분석, 공장자동화를 위한 컴퓨터 응용 등이다. 현재 자동화 시스템 공동연구소와 KOSEF의 지원을 받는 제어계측 신기술 연구센터의 소장이며, 또한 MAP/TOP 국제 연맹에서 한국을 대표하는 KMIIG의 부위원장이다.