

# 制御理論의 歴史的 概要 및 展望

徐 丙 高

漢陽大工大助教授

## 1. 序 論

우리 사회의 산업구조 및 사회 구조는 고도의 경제성장과 중화학공업의 꾸준한 진척으로 복잡 다양성을 띠게 되었다. 복잡한 사회구조나 산업 구조를 어떠한 시스템들로 우리는 생각할 수 있다. 시스템의 효율적인 운영 및 설계는 이것을 잘 분석하고 제어(control)할 수 있을 때 이루어질 수 있다. 그러므로 제어이론은 고도의 기술공업국가로 지향하고 있는 우리 사회의 요청에 의해 필요성이 인식되게 되었으며 선진국가와 보조를 맞추는 가장 발달한 연구 분야중의 하나가 될 것이다.

## 2. 역사적 개요 및 해설

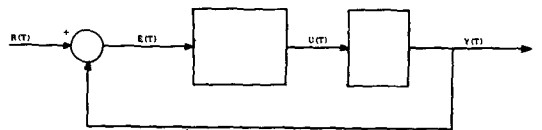
제어이론 발달의 초창기는 1940 년대에서 1960 년대 사이라고 볼 수 있다. 이 때의 이론은 서어보기구(servomechanism)이론, 혹은 고전적 제어이론으로 간주되고 있다. 이 시기에 발달한 이론은 일정한 상수를 포함하는 선형미분방정식들에 의해 묘사되었으며 단일 제어입력(control input)에 특성을 나타내는 시스템들의 개발을 위한 것이었다. 라프라스 변환(Laplace transform)의 의해 이러한 시스템들은 주파수 영역에서 분석될 수 있었으므로 시스템의 동력학(dynamics)관계를 전달함수에 의해 나타낼 수 있었다.

물론, 이때 설계방법의 발전을 위한 주요한 동기가 된 것은 해군과 지상군이 무기 시스템을 위

한 정확한 사격제어 시스템의 필요성에 의한 것이다. 화학적 및 산업적 과정의 제한(feedback) 제어등의 이론은 이 시기말에 출범하였다.

고전적 이론에 의해 생겨난 설계상 연장은 필연적으로 계산도구들과 유용한 시뮬레이션 시설들에 의해 큰 영향을 받았다. 그래서 대부분의 설계상 연장은 그림을 그려서 푸는 데 있었다. 예를 들면 니케스트 선도(nyquist diagram), 보디 선도(bode plot), 니콜라스 선도(nichols charts), 루우트 로커스 선도(root locus plots) 등이 된다. 즉, 이 당시에는 단지 폐쇄형태의 해(closed form solution)이 찾아졌다.

고전 이론의 기본적인 발달은 아래의 그림을 참조할 때 이해되어 질 수 있다.



$r(t)$  : 기준입력 (reference input)

$e(t)$  : 편차신호 (error signal)

$$[e(t) = r(t) - y(t)]$$

$u(t)$  : 제어입력 (control input)

$t(t)$  : 실질적출력 (actual output)

여기에서 중심된 생각은 실질적인 출력  $y(t)$  를 기준입력  $r(t)$ 에 가능한 한 가깝게 조정시키는 것이다. 편차신호  $e(t)$ 는 물리적 시스템에 응용되어 지는 실질상의 제어신호에 의해서 조작부에 의해 전환되어 지는 불필요한 편차(deviation)의 측정 값이다. 초보적인 수준에서는

항상 조작부가 편차신호를 작게 유지하도록 하는 방법이 중요한 설계문제가 되어왔다.

좀더 복잡하고 강력한 제어이론의 발전으로 접어들기 시작한 시기를 제 2의 시기라 볼 수 있으며, 이 때의 이론을 현대 제어이론으로 간주한다. 이 현대 제어이론은 1956 년경에 원천을 찾아볼 수 있으며 현재까지 가장 활발한 연구분야중 하나로 생각 되어진다. 특히, 이 이론은 미사일과 항공시대에 접어들면서 각광을 받게 되었다. 항공 시스템들은 극단적인 비선형으로 볼 수 있으며 기체의 운전(motion)이나 운전수행(performance)은 다수의 유용한 제어 입력들의 영향을 받을 수 있다. 그러나 재래식 제어이론은 선형신호입력(linear signal input)시스템들만을 위한 것에 사용될 수 있다. 그래서 이러한 항공 시스템의 어려운 요구조건을 위해 좀더 일반적인 설계방법이 요구 되었으며, 즉 현대 제어이론의 발달을 가져오게 되었다. 현대 제어이론 및 이와 관련된 설계방법들의 본격적인 발달은 60년대 초기의 현대 디지털 컴퓨터의 출현에 의해 이루어지게 되었다. 디지털 컴퓨터는 제어 문제들에 대한 해결방법에 큰 영향을 주었다. 좀더 상세히 말하면, 고전적 제어이론에서는 폐쇄형의 해를 찾아야만 했으나 현대 제어이론에서는 순환 알고리즘(recursive algorithm)을 사용하게 되었다. 이와 같은 해석적인 해에서 대수식 해(algebraic solution)로서의 변천은 연구 방향과 사고에 새로운 길을 열어 주었다.

현대 제어이론에 있어서 중요한 요소는 최적상태(optimization)였다. 최적설계(optimal design)를 향한 새로운 자세는 어떠한 설계가 좀더 합당한 것인가에 대한 합리적인 결정을 짓기 위해서 시간과 상관함수인 여러개의 제어와 상태 변수들은 동시에 검토하기는 어렵다는 사실에 의한 필연성으로 생겨난 것이다.

다변수 제어문제를 해결하기 위해서는 우선 종

은 시스템 수행의 중요한 기여요소(attribute)들을 스칼라 수학적인 수행 색인표(scalar mathematical index of performance)로 전환시키는 것이 중요하다. 여기서 스칼라 수학적인 수행 색인표란 시스템의 미분방정식들에 의해 최적상태화(optimization)하는 것 이외에 문제의 물리적 성질로부터 발생하는 제어와 상태변수에 대한 부가적인 제어들에 의해 최적상태화 되는 수행을 말한다.

현대 제어이론의 초창기 시대에는 2개의 강력한 이론적인 접근들이 있었다. 제 1의 접근은 고전적인 변량의 계산(calculus of variation)방법을 최적제어문제(optimal control problem)에 연장시키는 일이었다고 이것은 소련 수학자 L. S. Pontryagin 과 그의 학생들에 의해 시도되었으며, 이것을 흔히 최대원리(maximum principle)이라고 부른다. 제 2의 접근은 미국의 수학자인 R. Bellman에 의해서 시도 되었으며 최적원리(Principle of optimality)에 근본을 두고 있으며 이것이 후에 동적계획 알고리즘(dynamic programming algorithm)을 이끌게 한 것은 주목할 만하다. 50년 말기에 이들 2개의 주요 이론적인 발전은 60년대 초기에 이 분야에 있어서 세계적인 연구 열풍을 낳게 하였다고 말할도 과언은 아니다. 다수의 디지털 컴퓨터 알고리즘이 최적제어(optimal control)문제를 정의하고 있는 복잡한 비선형 방정식들의 대수해(numerical solution)을 위해 사용 되어질 수 있도록 개발되었고 대기내(endoatmospheric)와 대기외(exoatmospheric) 항공 시스템을 위해 상당히 성공적으로 다양하게 복잡한 궤도 최적상태화 문제들에 적용되었다. 이들 연구의 부산물로서는 최적 확률적 예측(optimal stochastic estimation)과 확률적 제어(stochastic control) 문제들을 위한 디지털 컴퓨터 알고리즘과 이와 관련된 조직적인 이론의 발전을 가져

왔다.

확률적 예측(stochastic estimation) 분야에서는 잡음감응기(noisy sensor)레이다로부터 어떠한 물리적 시스템의 매개변수와 주요 상태 변화들의 예측을 재조직(reconstruction)하는 것이 시도 되었으며 최적 확률적 예측 알고리즘의 발전을 위한 촉진제 역할을 한 중요한 종류의 응용들은 레이다 혹은 조나(sonar)에 의해 어떠한 목표물을 추적하는 것들이라 할 수 있다. 레이다나 조나는 잡음 영역이나 각도측정 문제를 발생하기 때문에 확률적 예측 알고리즘들은 개선된 위치예측(improved position estimate), 속도예측(velocity estimate), 표적분류 예측(target classification estimate)들을 얻기 위해서 잡음감응기(noisy sensor)테이타들을 수행시킨다. 현재의 Kalman filter의 확장으로서 볼 수 있는 다양한 확률적 예측 알고리즘(stochastic estimation algorithm)들이 있다.

확률적 예측 알고리즘들은 관성항행방식(inertial navigation system)들에서는 위치정확도(position accuracy)의 증진을 위해 사용되어 왔다. 최근의 한 연구는 잡음함의 위치정확도(position accuracy)를 좀더 증진시키기 위해서 관성측정장치(IMU; inertial measurement units)들을 중력적으로 얻어진 측정들과 전기장으로부터 얻어진 측정들에 결부시키는 방법을 보여주고 있다. 확률적 예측이론(stochastic estimation theory)나 이와 관련된 알고리즘들은 다방면의 응용분야들에서 그 자체들만으로서도 중대한 역할을 할지라도 이들이 제어 문제에 결합(couple) 되었을때는 좀더 중요성을 보여 준다. 최적 확률적 제어(optimal stochastic control)와 관련된 알고리즘들이나 이론은 유용한 sensor-configuration과 이들의 accuracy 특징들 뿐 아니라 시스템 행동을 묘사하는 동적 확률적(dynamic stochastic) 미분방정식들에

부과된 제한적 요소들에 달려 있는 전체적인 수행색인표(index)를 최적상태화(optimization)하는 문제를 다루고 있다.

최적 확률적제어(optimal stochastic control)에 있어서 대부분의 이론적인 진보는 지난 10여년 동안에 이루어져 왔으며 최적 확률적(optimal stochastic)문제들은 비교적 잘 이해되었다. 다이나믹 프로그래밍 알고리즘(dynamic programming algorithm)들이 쉽사리 확률적 경우(stochastic case)로 다루어질 수 있기 때문이었다. 그럼에도 불구하고 최적 확률적 제어(optimal stochastic control)와 관련된 어려운 실시간 계산(real time computation) 요구조건들이 남아 있다. 이와 같은 문제들은 결정론적 최적상태화(deterministic optimization)와 확률적 예측(stochastic estimation)의 문제의 초점과 그들사이에 상호작용을 포함하고 있다. 이것을 우리는 쌍무제어(dual control) 문제라 부른다.

실제적인 최적 스택스틱의 계산이 성취될 수 없을지라도 수학적 이론은 최적(optimal)해들의 성질(nature)에 있어서 인사이트(insight)를 제공하여 준다. 어떤 특정한 물리적 문제에 관한 일반 상식적인 엔지니어링 "노우-하우"와 함께 이러한 인사이트(insight)는 일반적인 설계방법을 바탕으로 한 많은 문제들에 최적(optimal)해들을 발달시키기 위해서 사용될 수 있다. Linear-Quadratic-Gaussian(L. Q. G.)방법은 지난 10여년 동안 다방면에 걸쳐 분석되어져 왔으며 많은 복잡한 문제에 성공적으로 적용되어 왔다. 이와 같은 설계가 종래의 설계보다는 현저한 증진을 보여 온 것은 가정사실이다.

### 3. 제어이론의 전망

앞장에서는 고전제어의 이론 및 현대 제어이론

의 역사적 고찰 및 토론을 시도하였다. 현재에 우리는 복잡한 제어문제들을 다룰 수 있기 위한 잘 정립된 이론이나 설계 알고리즘(algorithm)들을 갖고 있다. 그러나 아직 유용한 이론들과 응용들 사이에는 거리가 있다.

3장에서는 미래에 중요한 3개의 연구 주제 분야의 소개와 그들이 왜 중요한지에 대해서 서술 될 것이다.

#### A. 대규모 시스템(Large Scale System)

고전 제어이론과 현대 제어이론은 centralized decision making이라는 중요한 가정아래 발달해 왔다. 이론과 관련된 알고리즘(algorithm)들 속에는 제어기(controller)가

(a) 완전한 시스템 역학구조(dynamics)

(b) 모든 불확실한 요소들의 확률적 묘사

(c) 전체적인 수행 색인표(the overall index of performance)의 지식을 갖고 있어야 한다는 함축된 의미를 포함하고 있다.

이러한 가정은 여러 방면의 응용에 있어서 완전히 성립하였다 할지라도 분명히 이미 존재하고 있는 구조/framework)내에서 다룰 수 없는 많은 복잡한 시스템들이 있다. 아래에 있는 예제를 가지고 설명하여 보자.

\*공격 상태에 있는 여러 척의 군함으로 구성된 함대의 방어(defense)문제를 고려하여 보자. 전 방어의 목표는 인명 및 장비의 손실을 최소한 줄여야 한다. 분명히 전쟁의 진화(evolution)는 탐지기(레이다 혹은 조나)들과 방어기(미사일, 총등)들의 배치(allocation)인 점에서 스토캐스틱(stochastic)현상을 나타낸다. 순수한 분산화(decentralization)된 전략은 유용한 함대의 자원들을 효과적으로 동원할 수 없기 때문에 최적(optimal)한 것이 될 수 없다. 한편, 지령탑에서 전 함대의 모든 행동을 매순간 지시할 수 있는 순수한 중앙집중적(centralized)인 전략을 생각하기는 힘들다. 개념적

으로는 중앙집중적인 전략은 공식화 될 수 있으나 통신의 조건이나 사령탑의 피해로 인한 전 함대의 피해등과 같은 것을 고려할 때 비현실적이다. 이 문제를 합리적으로 처리하려면 제충적 명령 조직을 만들어야 한다. 총괄적(overall)인 방어목적(objetive)은 남아 있는 방어 자원(resource)들의 함수로서 부목적(subobjective)들로 분배되어야 한다. 이 예제는 제어기(controller)들과 제한된 통신 문제를 갖고 있는 스토캐스틱 다이내믹(stochastic dynamic)시스템의 문제들을 나타내 주고 있다. 전력시스템, ABM방어 시스템, 수동네트워크, 경제 시스템등에서도 비슷한 성격의 문제를 찾아 볼 수 있다. 이와 같은 큰 규모 시스템의 문제들은 고전적인 서어보기구(servomechanism)의 기술에 의해 해결 될 수 없다. 현재의 설계들은 시뮬레이션(simulation)에 의해 보조를 받고 있으며 정적(static) 혹은 준정적(quasi-static) 모드(mode)로 연구 되어지고 있다. 그래서 이것이 심각한 결함이 발생했을 때 시스템이 가동되지 못하는 이유가 되는 것이다. 현재 우리는 대규모 시스템의 정립된 이론을 못 갖고 있다. 그래서 우리는 이것을 하루 속히 개발시켜야 한다. 개발된 이론은 물리적으로 합당할 뿐만 아니라 기술적인 문제들을 해결할 수 있어야 할 것이다. 우리는 마이크로프로세서(microprocessor) 시대에 살고 있다. 이와 같이 값이 싸고 신뢰성 있는 도구의 등장으로 저비용에 의한 분포계산(distributed computation)을 할 수 있게 되었다. 그러므로 우리는 이론에 있어서나 설계방법에 있어서 마이크로프로세서, 분포계산, 집중배제적 제어등의 현재 및 계획된 특징들을 고려하여야만 할 것이다.

#### B. 마이크로프로세서(microprocessor)

중래의 제어 시스템 설계를 위한 마이크로프로세서의 사용 능력은 이론적으로나 응용 연구

에 있어서 무한한 것으로 생각되고 있으나 아직 개발되지 않고 있다. 고전적 및 현대 제어이론은 컴퓨터 및 구조에 의해 크게 영향을 받지 않았다. 그 이유는 이론 발달의 초창기에는 제어기의 도구화(implementation)는 특성(nature)에 있어서서는 아날로그(analog)이었고 후기에 있어서도 디지털 제어를 위한 특수 사용 미니컴퓨터들이 유용했기 때문에 그 도구화를 위한 어떠한 장애도 나타나지는 않았다.

저비용이며 신뢰성 있는 마이크로프로세서의 존재는 복잡한 제어 시스템의 설계를 위한 새로운 기회를 마련하여 준 것이다. 그러나 마이크로프로세서의 특이성 및 구조등은 이론에 의해 다룰 수 없는 문제점들을 내포하고 있다. 제어 이론이 새롭고 개선된 설계들을 위해서 빠르게 개척되는 기술혁신의 전통을 따르다면 마이크로프로세서에 의한 도전(challenge)을 직면하게 될 것이다.

제어시스템의 전 행동(behaviour)에 속해 있는 量(quantity)들 뿐만 아니라 제어 알고리즘의 복잡성을 내포하는 量(quantity)들의 수행(performance)을 위한 전체적인 색인표를 반영시키는 것은 중요하다. 제어와 상태 변수들에 있어서 시스템에 의해서 부과된 일반적인 제한적인 요소들 이외에 기억소자나 한정된 낱말(word)의 길이(length)같은 것들이 제어나 신호 처리를 위한 마이크로프로세서의 사용에 많은 제한적 요소를 가하고 있다. 디지털 보상기(compensator)의 설계에 활용될 수 있는 방법이 동조(synchronous)형태인 점을 이론적으로 조사를 할 필요성이 있다. 여기서 동조형태란 제어 명령의 발생과 센서(sensor)들의 표준화(sampling)가 일정한 시간 간격으로 수행되어 진다는 의미다. 한편, 마이크로프로세서를 사용하는 복잡한(nontrivial) 응용에서는 비동조(asynchronous)의 운영을 필요로 하게 될 것이다. 이

렇게 하여 우리는 현존하는 이론과 욕망되는 도구화(implementation)에 있어서 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 분명히 이 사실은 유용한 이론은 재평가 및 수정되어야 하며 마이크로프로세서의 기술적 혁신에 보조를 맞추어 새로운 개념적 운곽을 채택하여야 할 것이다.

결론적으로 말하면 마이크로프로세서를 합리적으로 사용할 수 있는 이론이 개발되어야 하며 또한 그것은 디지털 보상(compensation)에 상호 연결 될 수 있어야 하겠다.

### C. 시스템 신뢰도(Reliability)

미래의 연구를 위한 또 하나의 중요한 연구분야중 하나는 신뢰성 있는 시스템 설계와 운영의 문제를 다루는 것이 될 것이다. 이 문제의 중요성은 신뢰성 있는 운영이란 다양한 응용에 있어서 결정적 요소가 되기 때문에 논할 여지가 없는 것으로 생각된다. 현재 우리는 이러한 문제를 다루기 위한 이론이나 조직적인 방법론을 갖고 있지 않다. 신뢰도(reliability)이론은 우리가 제어에 있어서 직면하고 있는 복잡하게 다이내믹(dynamic)하며 스토캐스틱(stochastic)한 경우를 다루는데 잘 부합되지 않고 있다.

이와 같이 우리는 아직 일반적인 이론은 갖고 있지 못한지라도 낙관적인 전망을 가져다 주는 여러 개의 조사논문이 있다. 이들의 주요 개념들이 1975년 MIT공대에서 개최된 연구 발표회(workshop)에서 잘 나타나 있다. 신뢰성 있는 설계를 하기 위해서는 엄격한(crucial) 작동기(actuator), 감응기(sensor)나 다른 주요 부품에다가 3중(triple)혹은 4중(quadruple)반복(redundance)를 행하여야 한다는 것이다. 항공기나 배 같은 고성능 시스템에는 완전 자동제어 되기 위해서 점차 상당량의 제어부품 및 센서(sensor)들을 사용하게 될 것이다. 새로운 센서(sensor) 및 작동기(actuator)마다 4중반복(quadruple redundant)되게 만든다면 안

전된 시스템 운영을 할 수 있으나 이것은 상당한 비용을 초래하게 될 것이다. 그래서 이 반복(redundancy)을 가능한 줄이는 방향으로 제어 시스템을 설계하도록 하여야 할 것이다. 결함탐지(failure detection)과 분리(isolation)은 지난 수년동안 상당히 중요한 연구분야가 되어왔다. 이 결함탐지(failure detection)과 분리(isolation)의 기본적인 개념은 Kalman filter와 같이 다이나믹 스토캐스틱 예측(dynamic stochastic estimation) 개념을 가설 검정적인(hypothesis testing) 생각과를 혼합한 것에 있다고 볼 수 있다. 일반적 운영 상태에서는 Kalman filter의 유수(residual)들이 조사 되었을 때 결함(failure)의 통계학적 속성에 있어서 어떠한 변화로서 나타난다. 일단 결함(failure)이 탐지 되었을 때는 결함 모드(failure mode)를 공식화 할 수 있고 일반화된 결함이 있을 가능성(generalized likelihood)의 비율을 사용하여 그 결함이 있는 부분을 검출하여 낼 수 있다.

결함탐지(failure detection)과 (isolation)는 신뢰성 있는 시스템을 설계하는데 있어서 병산의 한 조각으로 비유될 수 있다. 그러나 이것은 실시간(real time)에서 제어 시스템을 재조직화 및 재구성 하는데 있어서 중요한 축점이 되며 많은 연구 분야가 열려 있다. 또한 이론적인 면과 응용면에 있어서도 많은 연구가 앞으로 진행되어야 할 것이다. 특히 중요한 것은 결함(failure)이 선언 되었을 시간과 분리(isolation) 되었을 시간 사이에 무엇을 하여야 할 것인가에 대한 문제이다.

결론적으로 말하면, fail-safe, fail-operational, fail-degradable한 제어 시스템의 설계를 위한 다이나믹 시스템 의존도를 위한 일반이론이 필요하다. 신뢰도와 제어 시스템 수행능력을 측정할 수 있는 방법을 시급히 개발하여야 한다. 또한 센서(sensor)와 작동기(actuator)

종류의 선택과 이들의 정확성 및 고유의 신뢰성과 반복(redundancy)된 수준등을 결정하여 주는 조직적인 컴퓨터 설계 기술들을 개발하여야 한다.

#### 4. 結 論

제어 이론의 역사적 개요 및 전망되는 3개의 주요 연구분야에 대해서 토론 및 연구 방향이 제시되었다. 이론의 발달은 실제적인 기술적 문제와 부합되도록 노력 되어져야만 할 것이 재삼 강조되는 바이다.

#### 參 考 文 獻

1. L.S. Pontryagin "optimal control processes" US. Mat Nauk, Vol. 14 PP. 3-20 1959: transtated in Am. Math S.C. Trans Vol. 18. PP. 321-339, 1961.
2. R. Bellman, "Dynamic Programming" Princeton University Press, Princeton, N. J., 1957.
3. R. E. Kalman, "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems" Trans ASME, J. Basic Engineering, Ser. D, Vol. 82, PP. 34-45, 1960.
4. Krushner, "Introduction to Stochastic Control", Holt, Rinehart, and Winston, N. Y., 1971.
5. E. Tst, Y. Bar-Shalom and L. Moier, "Wide Seuse Adaptive Deal Control for nonlinear Systems" IEEE Trans. on Adaptive control, Vol. AC-18, PP.98-108, 1973.
6. M. Athans(eds) "Special Issue on Linear Quadratic Gaussian Problem" IEEE Trans on Automatic Control, Vol. AC-16, No. 6 December 1971.
7. N.R. Sandell, P. Varia, and M. Athans, "A Survey of Decentralized Control methods for large Scale Systems", in ERDA Report CONF-750876 systems Engineering for Power : Status and Prospects ( L. M.