

## 적응제어 설계기법의 연구현황

최진영

서울대학교 전기공학부

### 1. 머리말

적응제어이론에 대해서는 1970년대부터 많은 연구가 이루어져 왔다. 적응제어연구는 선형모델을 대상으로 연구가 시작되었으며 현재는 비선형 모델에 대한 적응제어 연구도 활발히 진행되고 있다. 적응제어 설계 기법은 크게 3가지 방향에서 발전되어 왔다. 첫째는 매개변수 추정을 기반으로 적응제어기가 설계되는 추정기반 설계 기법 (Estimation - based Design Technique) 이고, 둘째는 안정도 이론을 기반으로 적응 메카니즘을 설계하는 안정도 기반 설계 기법 (Stability-based Design Technique) 이며, 셋째는 적응제어 이론 연구의 주류인 매개변수를 적응하는 방법이 아니고 불확실성의 전체적인 양을 적응 추정하는 비매개변수 추정 설계기법 (Nonparametric Estimation Technique)이다. 추정기반 설계 기법은 자기동조제어 (Self-Tuning Control, STC)를 시작으로 연구되기 시작하였으며, 현재 다변수 적응예측제어 (Multivariable Adaptive Predictive Control) 이론으로 연결되어 활발히 연구되고 있으며 화학공정 등의 응용에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다. 안정도 기반 설계기법은 Lyapunov 안정도 이론, Passivity 안정도 이론, 초 안정도 이론 (Hyper-stability) 등에 기반하여 기준 모델을 추종하도록 제어기의 적응 메카니즘을 설계하는 방법으로써, 모델기준 적응제어 (Model Reference Adaptive Control, MRAC)가 대표적인 방법이다. 이 안정도 기반 적응제어 설계 기법은 적응 비선형 제어 (Adaptive Nonlinear

Control) 이론의 근간이 되었으며, 현재 적응 비선형 제어 이론에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 세번째 비매개변수 기반 설계기법은 적응 슬라이딩모드 제어 (Adaptive Sliding Model Control), 시간지연 적응제어 (Time Delay Adaptive Control), 외란 적응제어 (Disturbance Accommodating Control) 등이 있으며 실제 응용 문제와 관련하여 많이 연구되고 있다.

본고에서는 이 세 가지 설계기법을 중심으로 적응제어 이론의 발전 역사 및 현황에 대해 간략히 기술하고자 한다.

### 2. 추정기반 설계 기법 (Estimation-based Design Technique)

이 기법의 대표적인 방법인 자기동조 제어(STC)방식은 간접적응방식으로 제어대상의 매개변수를 먼저 추정한 후 이를 이용하여 제어기의 매개 변수를 적절히 변화시키는 방식으로 출발하였으나 (Indirect Adaptive Control), 제어기 매개변수를 직접 추정하는 직접적응제어 (Direct Adaptive Control) 방식도 제안되었다. 직접적응 STC는 MRAC와 기능적으로 일치한다고 볼 수 있다. 그러나 직접 적응 STC는 제어기의 매개변수 추정 기법에 관심이 주어지며, 따라서 최소 자승 추정 (Least Squares Estimates) 알고리즘이 사용되지만, MRAC 는 안정도 이론을 이용해서 제어기의 적응 법칙을 설계하여 전체적인 안정도를 보장하도록 설계하는 점이 다르다고 볼 수 있다. 간접적응 STC는

시스템의 매개변수를 식별한 후 제어기 설계는 여러 가지 방법을 적용할 수 있어 다양한 형태의 제어방법이 제시되었다. Deterministic 시스템인 경우는 극·영점 재배치에 의한 제어가 주로 사용되었으나 (Wellstead, et.al., 1979, Int. J. Contr.), 이 방법은 제어대상이 최소위상(Minimum Phase)시스템이라는 가정 하에 이루어진 것이다. 기준 모델제어기법에서 요구하는 최소위상에 관한 가정은 매우 제한적인 조건으로, 일례로 연속시간 시스템을 이산화(Discretize)하면 결과적인 전달함수가 비최소위상(Nonminimum Phase)시스템이 되는 경우가 발생한다. 비최소위상 시스템에 관해 Elliott 등(1985, IEEE AC)은 Bezout 항등식과 Block Invariant 추정 방법을 이용하여 적응 극점 재배치(Adaptive Pole Placement) 제어 기법을 제시한 바 있다. Stochastic 시스템인 경우는 최소분산제어 (Minimum Variance Control)개념을 적용하였고 (Astrom, et.al., 1973, Automatica), 이 방법들은 출력의 분산을 최소화하는 접근 방법이므로 입력의 크기가 매우 커지는 점을 고려하지 않았다. 이후 입력의 크기를 비용함수에 고려한 일반화된 최소분산제어 (Generalized Minimum Variance Control)로 확장되었다 (Clarke, et.al., 1975). 이러한 방법들은 시스템의 매개변수 추정 후 어떤 목적함수를 최소화하는 제어를 설계하는 방법에 기반을 두고 있으므로 일반적인 최적제어 (Optimal Control)이론을 적용하는 연구가 수행되었다 (Grimble, 1984, Automatica). 또한 최소분산제어에서 상대차수의 한계를 극복하기 위한 방법으로 이동평균제어 (Moving Average Control)로 확장하였다 (Astrom, et.al., 1985, IFAC Symposium on ISPE). 이는 그 후 적응 예측제어의 동기가 되었다.

한편 Clarke et al., (1987, Automatica)가 제안한 일반 예측 제어 (GPC: generalized predictive control)에 의해 대표되는 예측 제어(Receding-horizon predictive control)는 일련의 출력 예측치들과 그 지령값 (Set-point) 들을 포함하는 비용함수를 최소화한다. Astrom과 Wittenmark (1973, Automatica) 계열의 제어 방식들이 시스템의 시간 지연에 해당하는 만큼의 시간이 지난

후의 단순 예측(single prediction)만을 사용하고 있는 데 반해, 예측 제어 기법들은 넓은 시간 범위 (Horizon)에 걸친 여러 개의 예측치들을 사용하기 때문에 일반적으로 시스템의 시간 지연 등에 상당히 강인한 제어 성능을 결과한다. 아울러 제어 법칙 (Control law)이 간단하고 개루프 시스템의 극점과 영점이 상쇄되는 경우에도 사용할 수 있어, 알고리즘화하는 과정에서도 매우 편리하다.

이 추정기반 적응제어 기법의 안정도, 강인성 등은 설계시 적용 법칙 설계시는 고려되지 않았지만, 이 기법의 안정도, 강인성 등에 대한 정성적인 해석 연구는 별도로 연구되어 왔다.

적응제어 시스템에 유한한 외란(bounded disturbance)이 가해지게 되면 안정도를 곧 잃어버리게 된다. 따라서 파라미터 추정값을 투사(projection)를 통해 어느 파라미터 영역의 제한된 영역으로 가두어 두는 방법 및 불감대(dead zone)를 설정하여 출력 오차가 어느 이하가 되면 파라미터 조정을 중단시키는 방법이 제안되었었다(Egardt, 1979, Springer-Verlag). 파라미터 조정 미분방정식의 시스템이 양실수(positive real) 조건을 만족시키지 못하면 어떤 고주파 입력에 대해서 시스템이 불안정해지는 것은 쉽게 보일 수 있다(Astrom, 1987, IEEE AC). 일반적으로 시스템 모델의 차수는 실제 시스템의 차수보다 낮다. 따라서 낮은 차수로 모델된 시스템 모델에 대해 적응제어를 설계하면 주로 고주파 영역의 모델화 되지 않은(unmodeled dynamics) 시스템을 불안하게 하는 요소로 작용하기 때문이다. 최근에는 적응제어 시스템의 무질서 운동(chaotic motion)을 유발할 수도 있다는 것이 보여졌다. 적응제어기가 강인하지 않는 이유를 다음의 두 가지로 설명할 수 있다. 첫째로 적응제어 시스템의 안정도를 보면 시스템이 지수 함수적(exponentially)으로 안정하지 않고 단지 점근적으로(asymptotically) 안정하다. 즉 그 안정도가  $L_2$ -sense에서 증명이 되기 때문에 조그마한 외란에 의해서도 안정도가 파괴될 수 있다(Anderson et. al., 1985, Syst. & Contr. Lett.). 둘째 관점은 다음과 같다. 적응제어를 설치할 경우 고전적인 제어기보

다 제어기의 대역폭(Band width, BW)이 넓어지게 된다. 그래서 제어기가 고주파영역에서 동작하게 되면 안정도를 보장할 수 없다는 것이다. 이에 대한 불안정성을 개선하기 위해서 강인 적응제어 알고리즘을 여러가지 형태로 변화시키는 연구가 진행되었다 (Tao, et.al., 1988, Int. J. ACSP, etc.).

일반 예측제어에 대한 안정도 연구는 Clarke와 Scattolini (1991, IEE Proc. D) 그리고 Mosca와 Zhang (1992, Automatica)에 의해 수행되었다. 이 연구에서는 등식 조건 (Terminal equality constraints)을 부가함으로써 안정도를 보장하였다. 최근에 일반적 형태의 예측제어 법칙 (General formulation)이 안정도 조건의 정련화 (Refinement)와 더불어 제시되었다 (Yoon과 Clarke, 1995, IJ. Syst. Sci.).

결론적으로 STR 방법에서부터 시작된 추정기반 적응제어 설계기법은 현재 다변수 적응예측제어로 발전되었고, 이 방법이 가장 응용가능성이 높은 것으로 기대되고 있다. 따라서 많은 현장 엔지니어들의 주목을 받아왔으며, Clarke (1988, Instrument Society of America)에 보고된 바와 같은 성공적인 적용 사례를 가지고 있다.

### 3. 안정도 기반 설계 기법 (Stability-based Design Technique)

안정도 기반 적응제어기 설계 기법의 대표적인 방법인 기준모델적응제어(MRAC)는 Whitaker, et.al. (1961, Inst. Aeronautical Sciences)에 의해 경사감소법에 기반하여 처음으로 제시되었다. 그 후 Butchart (1965, IFAC Sym. Adaptive Control)는 경사감소법의 안정도를 해석하여 안정도를 보장할 수 없음을 밝혔다. 그 후 Parks (1966, IEEE Tr. AC)가 리아프노프 안정도 이론을 이용하여 안정한 기준모델적응제어기를 설계하는 방법을 제시하였다. 이 리아프노프 안정도에 기반한 적응제어기 설계기법은 Narendra 등에 의해 많은 연구의 진전이 있었고, 근래 비선형 시스템에 대한 적응제어 설계 방법의 기본 골격이 되었다 (Kokotovic, 1992,

IEEE CS Magazine).

한편 입출력 안정도 이론에 기반한 설계 기법으로는 MRAC 제어기의 오차 모델을 유도하고 이 오차 모델이 안정하도록 적응법칙을 설계하는 방법이 있다 Monopoli(1974, IEEE AC). 이 방법은 positive-real과 passive 라는 두 가지 개념을 적용하여 안정한 적응제어기를 설계한다. 이 오차모델을 전향경로(forward path)의 선형 부분과 궤환경로(feedback path)의 비선형 부분으로 구성할 수 있다. 선형 부분이 양실수(positive-real)조건을 만족하고 비선형 부분이 부동성(passivity)을 만족하면 시스템은 전체적으로 안정하다. 시스템이 양실수(positive real) 조건을 만족시키지 않을 때도 안정한 적응제어기를 구성할 수 있다. 이때, 상대차수가 1이상인 경우는 확장된 에러(augmented error) 기법을 사용하여 설계할 수 있다. 또 다른 설계 방법으로는 Landau (1972, IEEE Tr. AC)가 제시한 초안정도(Hyperstability) 기반 설계 기법이 있다.

비선형 모델에 대한 적응제어 기법과 관련하여서는 적응 궤환 선형화제어는 Nam & Arapostathis (1988, IEEE AC)가 궤환 선형화(feedback linearizable)될 수 있는 pure feedback nonlinear system에 대해 적응제어 설계기법을 제안했다. 그 후 Sastry & Isidori (1989, IEEE AC)에 의해 그 결과가 확장되었다. 그러나, 상기 논문은 모두 비선형시스템의 상태벡터가 알려져 있다고 가정하였는데 비해 Kanellakopoulos et al. (1991, IEEE AC)와 Marino & Tomei (1993, IEEE AC)는 상태 벡터를 모르는 상태에서 출력만 사용한 적응제어기를 구성하였다. 특히 Marino & Tomei는 time-dependent 좌표변환(filtered transformation)을 이용하여 시스템이 matching condition 및 positive real condition을 만족하도록 변환시키는 기법을 사용했다. 그러나 Marino & Tomei의 결과는 복잡성 때문에 실제 시스템에 사용하기에는 어려운 문제점이 있다.

최근 비선형 시스템에 대한 적응제어기법으로 리아프노프 안정도에 기반한 설계 기법을 근간으로 하고 있는 적응 역보행 제어 (Adaptive Backstepping Control) 기법이 Kokotovic (1992, IEEE CS Magazine)

에 의해 제안되어 관심의 대상이 되고 있다. 이 방법은 궤환 선형화와는 달리 일괄적인 변환식을 구할 필요 없이 상태 방정식의 각 변수 식 별로 선형화를 단계 별로 실시한다. 따라서 선형화 과정이 간단하고 다양한 형태의 변환이 가능하다는 장점이 있어 현재 많은 연구가 되고 있는 기법이다. 또한 역보행 제어에 적응제어를 도입할 경우 궤환선형화 제어와는 달리 제어기에 매개변수 미분항이 없어진다는 장점도 있다. 뿐만아니고 이 방법은 매개변수가 실제 값으로 수렴하도록 설계하기보다는 전체 시스템이 원하는 기준 모델로 수렴하도록 설계된다. 즉, 설계된 적응법칙에 의해 매개변수가 참값에 수렴하지 않더라도 리아프노프 안정도 이론에 의해 기준모델의 출력을 추종하게 된다. 이 설계 기법은 최근에 제안되어 제한된 시스템에 대해 설계 기법이 적용되고 있으며, 현재 이의 적용 범위를 확장하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

매개변수 추정기반 설계 기법은 비선형 시스템에 적용하는 연구가 성공적이지 못하나, 안정도 기반 적응제어 설계 기법에 관한 연구는 비선형 적응제어 연구로 성공적으로 연결 확장되었다. 이 안정도 기반 설계 방법은 적응제어 시스템이 안정성을 갖도록 설계된다는 측면에서 장점이 있으나 잡음이나 불확실성을 고려하지 않는다는 측면에서는 응용가능성이 떨어지는 단점이 있다.

#### 4. 비매개변수 추정 기법 (Nonparametric Estimation Technique)

비매개변수 추정 기반 설계 기법으로는 TDC (Time Delay Control)이 있다. 이 방법은 상기한 방법들과 달리, 특정한 매개변수의 추정이나 제어 입력의 스위칭 작용을 사용하는 대신에, 불확실성의 전체적인 양에 대한 직접적인 추정을 사용하고 있으며, 이러한 추정은 시간지연추정의 과정을 통하여 이루어진다. 상술한다면, TDC는 플랜트의 예측하지 못한 외란과 미지의 비선형항들을 망라해서 공칭모델에 첨가되는 불확실성의 향으로 치환하고 그 불확실성의 전체적인 항을 시간지

연추정을 통하여 직접적으로 추정하고 궤환을 통하여 즉각적으로 상쇄한 다음 계가 원하는 동역학을 갖게끔 하는 것이다. 이러한 TDC는 이득 조절이나 매개 변수에 대한 추정이 필요하지 않고 슬라이딩 모드 제어 기법에서 흔히 요구되는 비선형 동역학 모델에 대한 실시간 계산이 필요하지 않으므로 상기한 제어기법에 대하여 매우 단순하고 효율적인 구조를 갖는다. 또한 비선형계에 대한 정확한 모델이 없더라도 제어기의 설계가 가능하며 모델오차가 제어기의 성능에 거의 영향을 주지 않는다는 장점을 지니고 있으며 진동등의 부작용도 없다. 상기한 TDC의 장점들은 여러 가지 실제 비선형계에 대한 적용사례를 통하여 확인되고 있다. TDC의 적용사례로는 비선형성이 강한 자기베어링 (Youcef-Touni et. al., 1992, ASME J. Dynamic Sys. Measur. & Contr.)에의 적용, 로봇 (Youcef-Touni et. al., 1991, ICRA)에의 적용등이 있으며 그 결과로서 계의 매개변수 변동과 예측하지 못한 외란에 대하여 매우 강한 제어성능을 보이면서 정상상태 오차가 없는 정확한 제어성능을 보이고 있다.

DAC는 Johnson (1968, IEEE AC)에 의해 제안된 방법이다. 이 방법은 기준모델을 설정하고 이 기준모델과 원래 시스템과의 모델링 오차 및 외란을 상태 변수화하고 이를 상태추정기를 이용하여 추정한 후 이를 소거하는 제어입력을 구하는 방법이다. 이 방법은 알고리즘이 비교적 간단하고 성능도 좋은 것으로 알려져 있다.

이 밖에도 적응슬라이딩 모드제어 (Adaptive Sliding Mode Control), PID 자동 튜닝 방법등 이 있다. 최근에는 적응 퍼지제어, 신경회로망을 이용한 적응제어 등이 연구되고 있으나 또 다른 적응제어 설계 방법의 흐름으로 본 고에서는 자세한 설명을 생략한다.

#### 5. 맺음말

본 고에서는 적응제어의 설계 기법의 연구 현황에 대해 살펴보았다. 매개변수 추정을 기반으로 적응제어 기 설계 기법 (Estimation-based Design Technique)은

자기동조제어를 시작으로 적응 최적제어 단계를 거쳐, 현재 다변수 적응예측제어로 발전하였고, 이는 화학공정 등 실제 플랜트에 응용될 가능성이 가장 높은 실용적인 설계기법으로 평가 받고 있다. 그러나 비선형 시스템에 대한 적응 연구는 활발하지 못한 형편이다.

한편, 안정도 이론을 기반으로 적응 메카니즘을 설계하는 연구는 선형 시스템에 대한 기준모델 적응제어를 시작으로 현재 비선형 시스템에 대한 적응제어 연구로 확장되어 현재 활발한 연구가 진행되고 있다. 앞으로 이에대한 이론 연구가 한동안 지속될 것으로 전망된다. 드러나 이 방법은 실제 시스템에 적용시 적합한 형태로 불확실성을 모델링해야 하며 그 작업은 그리 용이하지 않을 것으로 판단된다. 그러나 부분적으로 이러한 응용연구에 대한 노력이 경주되어야 할 것이다.

비매개변수 추정방법은 적응제어 이론의 주 설계 기법은 아니기 때문에 이론으로의 확장 연구는 그리 활발하지 못한 것으로 판단된다. 그러나 비교적 설계 방법과 불확실성 모델링이 간단하여 실제 응용에 가장 용이하게 적용될 수 있을 것으로 생각된다.

## 저자소개

### 최 진 영

1982, 1984, 1993년 서울대학교 제어계측공학과 학사, 석사, 박사

1989 - 1994 한국전자통신연구소 연구원, 선임연구원

1994 - 현재 서울대학교 전기공학부 조교수

주 관심분야는 신경회로망 연산 및 제어 (Neural Computing and Control) 이론 및 응용

(151-742) 서울 관악우체국 사서함 34호 서울대 전기공학부

TEL: (02) 880-8372

FAX: (02) 885-4459

E-mail: jychoi@iipl.snu.ac.kr

- 담당 편집위원:

김종원 교수 (서울대학교 기계설계학과) -