

자동제어의 역사와 전망

An Overview of the Automatic Control Theory and Its Prospect



양 주 호

J. H. Yang

- 1953년 10월 5일생
- 부경대학교 공과대학 제어기계과
- H_∞ 제어기법에 의한 강인한 제어계 설계, 디지털관의 제어 및 어선의 자동화에 관심있음.



정 병 건

B. G. Jung

- 1959년 9월 25일생
- 한국해양대학교 해사대학 기관공학부
- 로바스트 제어, 마이크로프로세서 응용에 관심있음.

1. 서 언

자동제어의 시초로부터 고전제어, 현대제어에 이르기까지의 제어이론의 발달과정을 시대별로 나누어 그 특징을 살펴보고, 자동제어계의 설계에 있어서 앞으로의 발전방향은 어디를 향하고 있는지 간략히 설명하고자 한다.

2. 자동제어의 개념

제어란 영어의 '컨트롤(control)'에 해당하는 단어로써 '조절하다', '억제하다' 등의 의미를 가지고 있으며, 제어공학에서의 의미는 '기계, 기구 또는 생산 설비 등의 각종 장치에 있어서 그 동작이나 상태를 필요에 따라 가감 조절하는 것'을 뜻한다. 제어중에서도 자동제어(automatic control)라 함은 수동제어에 대비되는 말로서, 앞에서 언급한 가감 조절의 동작을 사람이 직접하지 않고 특별히

고안된 장치 또는 기구를 이용하는 것을 뜻한다.

이 자동제어라는 용어를 사용한지는 그리 오래되지 않았음에도 불구하고 자동제어의 개념은 기원전부터 있어 왔다. 자동제어의 현상을 공업에 적극 이용한 최초의 시도는 1788년 J. Watt가 증기기관의 속도조절을 위하여 원심식 조속기(Fly-ball governor)를 사용한 것으로 보는 것이 지배적이며, 이것을 자동제어의 시초로 보는 것 또한 제어 연구자들의 대부분의 견해이다.

이 증기기관 속도제어계의 특징으로는 '자동적이다', '피드백 원리가 사용되었다', '어떤 물리량(여기서는 회전속도)을 일정히 유지한다' 등을 들 수 있다.

이와 같은 자동제어의 특징적 원리는 현대의 항공기나 선박의 침로를 일정히 유지한다던가, 발전소에서 생산한 전력의 전압과 주파수를 일정히 유지하기 위한 자동제어에 그대로 이용되고 있으며, 이러한 제어계를 조절계라 한다.

자동제어의 또다른 하나의 목적은 제어량을 기준량(명령 또는 목표량)에 추종하도록 하는 것이다. 즉 선박의 조타장치, 인공위성 추적장치 등에 이용되고 있는 제어원리로서 이를 추종제어계라 하기도 하는데 역시 피드백 원리를 이용하고 있다.

조절계에서는 외란의 영향을 가능한한 억제하면서 기준량과 제어량간의 편차를 뒀 수 있는한 작게 하고, 추종제어계는 시간적으로 변화하는 기준량과 제어량간의 편차를 가능한한 작게 하고자 한다. 편차를 뒀 수 있는한 작게 한다는 생각으로 제어기의 게인을 크게 하면 제어계 전체가 불안정하게 되어 헌팅이 발생하게 되며 심할 경우 모든 장치가 파손되기도 한다.

제어이론의 탄생과 발전은 제어시스템의 안정도를 높이면서 제어의 질을 높이는 제어기 설계법을 얻는 과정과 함께하고 있다고 해도 과언이 아니다.

3. 자동제어의 발달사

필자는 학부 시절 자동제어란 과목을 한 학기 동안 이수하고도 이 학문이 무엇을 하는 학문 분야인지 감(感)을 잡지 못했던 적이 있었던 것이 사실이다. 그 후 뒤늦게야 깨달은 바이지만 제어공학을 공부하는 최종의 목적은 어떤 제어대상(플랜트, 프로세스 등)이 희망하는 설계 사양을 만족하도록 제어계를 설계하는 것이며, 난해한 제어이론을 개발하고 검증하는 일련의 행위는 궁극적으로는 모두 이를 위한 것으로 보아도 될 것이다.

본고에서는 자동 제어의 발달사를 돌이켜 보면서 시대별로 제어계의 설계법 및 이용된 제어기법을 고찰해 보고자 한다. 우선 자동제어의 발달사를 요약하면 표1과 같다.

앞에서도 언급한 바 있지만 자동제어가 언제부터 시작되었는지 확실한 역사적 근거를 찾기 힘들지만, J. Watt 가 증기기관에 원심식 조속기를 사용한 것이 자동제어의 시초라고 볼 수 있으나, 이는 조속기를 사용했을 따름이고, 이 조속기에 이용된 피드백 제어계가 쉽게 불안정하게 되는 상황 즉, 조속기와 증기기관 사이의 상호 간섭작용을 규명하지는 못하였다.

이후 1868년에 J. C. Maxwell 이 조속기 시스템

의 연구를 거듭하던 중, 시스템의 안정 판별을 위해 근을 실제로 구하지 않으면서도 대수방정식의 계수로부터 모든 근의 실수부가 음의 값을 갖는지를 알 수 있는 방법은 없을까 하는 의문을 제시하였다. 이러한 의문에 답하여 1877년 E. J. Routh 가 Routh 안정 판별법을 발견하고, 더 나아가 1895년 수학자 A. Hurwitz가 이 이론을 체계화하였는데, 이것이 바로 오늘날에도 많이 이용되고 있는 Routh - Hurwitz 안정 판별법이다.

안정 판별에 대한 또 하나의 중요한 연구는 1932년 미국의 Bell 전화 연구소에서 근무하던 H. Nyquist 가 피드백 루프를 가진 진공관식 증폭기 회로의 안정에 관한 연구 도중 발표하게 된 주파수 영역에서의 안정 판별법인 Nyquist 안정 판별법이다. 이후 H. W. Bode 의 Bode선도에서의 안정 판별법이 제안되면서 자동제어 이론은 군사용 무기 뿐만 아니라 산업용 장치에 적극적으로 도입되기 시작하였다.

또한 1942년 경에 J. G. Ziegler 와 N. B. Nichols 에 의한 PID 제어기 파라미터의 최적 조정법이 발표되고, W. R. Evans 의 근계적법과 샘플링 제어이론 등이 추가되면서 1950년 경에 고전적 제어이론이 체계화되어 1960년 경에는 완결 단계에 이르게 되었다.

한편 고전적 제어이론이 체계화되는 단계에 이를 즈음, 상태변수라는 개념을 중심으로 한 새로운 제어이론에 관한 연구가 시작되면서, 1950년에 R. E. Kalman이 상태공간 표현을 사용한 시스템 이론을 전개하였다. L. S. Pontryagin 등은 최적제어에 대하여 최대원리를 1956년에, R. Bellman 은 동적계획법을 1957년에 발표하였다.

이렇게 등장한 현대제어 이론에서는 상태(state) 변수가 주인공의 역할을 하지만, 시스템의 모든 상태를 측정할 수 없는 관계로 입력력 관계로부터 상태를 추정할 필요가 생기게 되었다. 이를 위해 확률론의 측면에서 칼만필터가 나타나게 되었고 확정론의 측면에서 관측기가 얻어지게 되었다.

현대제어 이론에서는 다입력 다출력, 즉 다변수계를 일반적으로 취급할 수 있으며, 그 가운데 최적제어 이론은 선형 레귤레이터 이론으로 정비되면서 LQ제어, LQG/LTR제어가 1980년대에 꽃을

표 1. 자동 제어 발달사

년 대	년 도	내 용
20세기 후 반	1990년대중	LMI 설계법 출현
	1991	m -해석/설계법 출현
	1990	K.S.Narendra와 K.Parthasarathy에 의한 Neural Network의 동적 시스템의 모델링 및 제어에의 응용 가능성 발표
	1988	K.Glover 와 J.C.Doyle가 H_{∞} 제어기 설계 해법 제안
	1981	G.Zames가 H_{∞} 제어 제안
	1980년대초	J.C.Doyle과 G.Stein이 LQG/LTR 제안
	1980년대초	컴퓨터의 발달로 최적제어를 실제에 활발히 응용, 강인성 문제(로바스트성)가 지적되기 시작함
	1970년대후	M.G.Safonov에 의해 안정도-강인성의 중요성 제시
	1970년대후	기약분해 표현에 의한 제어이론 출현(고전제어와 현대제어의 융합)
	1970년대중	퍼지 제어 연구 시작
20세기 중 반	1970년대초	Geometric Approach
	1965	L.A.Zadeh가 퍼지집합 제창
	1960년대초	R.E.Kalman에 의해 상태공간 표현법 제안으로 최적제어(LQG) 개시
	1963	L.A.Zadeh, C.A.Desoer의 시스템이론, 컴퓨터 제어 시작
	1960	고전적 제어이론 완결
	1958	적용제어 연구가 활발해짐
	1957	R.Bellman의 동적계획법
	1956	L.S.Pontryagin 등의 최대원리
	1952	W.R.Evans의 근계적법
	1950	현대제어이론 연구시작
20세기 초반	1942	J.G.Ziegler - N.B.Nichols 등의 PID 파라미터의 최적 조정 조건
	1940	H.W.Bode가 Bode선도 제안
19세기	1932	H.Nyquist의 안정판별법
	1895	A.Hurwitz가 안정법(Routh - Hurwitz의 안정판별법) 제안
	1893	A.Stodola의 터빈 수차의 조속에 관한 연구
	1892	M.A.Lyapunov의 안정이론
	1877	E.J.Routh이론(안정이론) 탄생
18세기	1868	J.C.Maxwell의 조속기 시스템 연구
	1788	J.Watt가 증기기관에 Fly ball식 조속기 이용, 자동제어계 시초
고 대	1779	Laplace변환
		기원전 수문 제어 이야기, 물시계 유량제어에 관한 이야기가 있음 (피드백의 개념이 고대에도 있었음)

피우게 되었다.

한편 플랜트의 상태를 알아내어 그 상태에 가장 적절한 제어를 구하고자 하는 적응제어 이론이

1974년 R.V. Monopoli 에 의해 발표되었다. 이에 대하여 하나의 정해진 제어기로서 특정범위에 속하는 미지의 외란이나 파라미터 변동 모두에 대응

표 2. 고전제어와 현대제어의 비교

제어법 요목	고전제어	현대제어
제어대상	단입력 단출력 시불변 선형시스템	단입력 단출력 시불변 선형시스템 +시변 시스템 +비선형 시스템
취급변수	제어대상의 입력변수와 출력변수	제어대상의 입력변수와 출력변수 +시스템 내부 상태변수
설계수법	각종의 제어 성능지표(정상편차, 감쇄계수, 게인여유, 위상여유 등)가 만족될 정도로 시행착오법에 따라 제어기의 파라미터를 선정	제어의 목적을 평가함수로 수량화하고 이 평가함수에 관하여 최적적인 제어기를 설계

하자고 하는 흐름이 생겨나게 되면서, 1981년 G. Zames가 강인성에 주목한 H_{∞} 제어 이론을 제안하였다. 1988년 K. Glover와 J. C. Doyle 이 두 개의 리카치 방정식(Riccati equation)을 풀므로써 H_{∞} 제어기의 해를 구할 수 있음을 발표함에 따라 H_{∞} 제어의 실용화에 대한 연구가 활발히 진행하게 되었다.

그리고 H_{∞} 제어 이론에 기반을 두고 더욱 진보한 제어계 설계 기법인 μ -해석/설계법(μ -synthesis) 및 LMI설계법이 출현되어 현재 연구가 활발히 이루어지고 있는 중이다.

이하에서는 여러 가지의 제어 이론 중에서 선형 제어이론을 중심으로 설명한다.

4. 고전제어

제어이론을 크게 분류할 경우는 고전제어와 현대제어로 나누는 것이 통상적이며, 양자를 간략히 대비하여 보면 표 2와 같다.

고전제어라 함으로서 시대에 뒤떨어지고 오래된 제어이론이라는 느낌을 독자 여러분에게 줄지도 모르지만, 현실적으로 볼 때 여전히 많은 제어계가 고전제어 이론에 기초하여 해석, 설계되어 산업현장에 널리 적용되고 있는 실정이다.

고전제어이론은 제어대상의 모델링에 있어서 선형미분방정식으로 표현되는 식에 라플라스변환을 행해서 얻어지는 전달함수가 그 중심 개념이기 때문에 단입력 단출력 시불변 선형시스템(single input - single output time invariant linear system)을 주요 대상으로 하고 있다. 따라서 취급되

는 변수도 입력변수와 출력변수에 국한된다. 또한 제어기는 PID 제어기(PID controller) 또는 진지상 보상기(lead-lag compensator)와 같이 그 구조가 미리 정해져 있다. PID 제어기의 전달함수는 식 (1)과 같고, 진지상 보상기의 전달함수의 일반형은 식 (2)와 같으며 제어계의 블록선도는 Fig. 1과 같다.

$$G_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \tag{1}$$

$$G_{LL}(s) = \frac{K(s+Z_1)(s+Z_2)}{(s+P_1)(s+P_2)} \tag{2}$$

- 여기서, K_p ; 비례게인
- T_i ; 적분시간
- T_d ; 미분시간
- K ; 진지상 보상기의 게인
- Z_1, Z_2 ; 추가할 영점들
- P_1, P_2 ; 추가할 극점들

로서 제어기 설계자가 결정해야 할 파라미터들이다.

그리고 제어기 설계기법으로는 Ziegler - Nichols의 PID제어기 최적 파라미터 선정법, Evans의

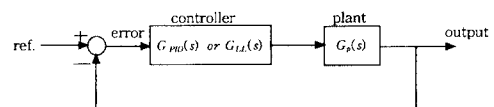


Fig. 1 Control system with the PID controller or the Lead-Lag compensator

근계적법, Nyquist 선도 및 Bode 선도법 등이 이용된다. 이러한 설계 기법들을 이용하여 주어진 시간 영역에서의 설계사양(정상편차, 입상시간, 정정시간, 오버슈트 등) 또는 주파수 영역에서의 설계사양(개인여유와 위상여유)을 만족하도록 시행착오적인 방법(try and error method)을 통하여 제어기를 선정하고, 나아가 선정된 제어기의 파라미터 값을 결정한다.

5. 현대제어

현대제어는 1950년대 L. S. Pontryagin의 최대 원리 및 R. Bellman의 동적계획법 등의 발표로 시작되었으나, 본격적인 연구는 1960년대 초 R. E. Kalman이 제어 대상으로 하는 시스템을 상태라는 개념을 도입한 상태공간 표현법을 제창함으로써 활발히 이루어졌다고 볼 수 있다.

상태공간 표현법은 종전의 전달함수 표현법이 입력변수와 출력변수만으로 시스템을 표현한 데 비하여, 이 표현법은 각각의 시각에 시스템의 내부 상태를 표현하는 상태를 변수로 도입함으로써 시스템의 내부 구조까지도 명확히 해석하는 것이 가능하게 되었을 뿐만 아니라 다변수 시변 시스템(multivariable time varying system) 및 비선형 시스템(nonlinear system)까지도 취급이 가능하게 되었다.

상태에 관해서는 가제어(controllability)와 가관측(observability)이라는 개념이 현대제어 이론의 가장 중요한 요소로 자리잡고 있는데, 먼저 가제어는 최초로 원점에 있던 상태점을 임의로 지정한 시각에 임의로 지정한 지점으로 옮기는 능력으로서, 가제어는 임의로 극배치가 가능하기 위한 필요충분 조건이 된다.

한편 폴란트의 상태라고 하는 것은 폴란트 내부 변수로서 모두 측정될 수 있는 것은 아니다. 반드시 측정 가능한 것은 입력과 출력이다. 간단히 설명하기 위해 입력=0이라 하고, 시각 0으로부터 t까지 계속 관측함으로써 x(0)를 유일하게 결정할 수 있을 때 시스템은 가관측이라고 한다. 임의의 수렴속도를 갖는 관측기를 구성할 수 있는 필요충분 조건은 시스템이 가관측인 것이다.

최근까지 현대제어의 중심적 역할을 해온 것이 최적제어(optimal control)인데, 최적제어라 함은 미리 주어진 평가함수를 최소로 하는 제어기법으로서, 주어진 평가함수는 ISE(integral square error), IAE(integral absolute error), ITSE(integral time square error), ITAE(integral time absolute error), 최소에너지, 최소연료, 최단시간, 상태와 제어입력의 2차형식(quadratic form)등이 있는데, 이들 중 주가 된 제어기법은 평가함수를 상태와 제어입력의 2차형식에 둔 LQ(linear quadratic)제어로서, 그 평가함수는 식 (3)과 같다.

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \tag{3}$$

여기서, x ; 상태
 u ; 제어입력
 Q ; 상태에 대한 하중 행렬
 R ; 제어입력에 대한 하중 행렬이다.

고전제어가 출력변수를 피드백하여 제어계를 구성하는데 비하여, 이 LQ제어 기법은 상태 피드백을 기본으로 하고 있으며 제어입력은 식 (4)와 같다.

$$u = -Kx(t) \tag{4}$$

여기서 K 는 상태 피드백 게인으로서

$$K = R^{-1} B^T P \tag{5}$$

와 같이 구해진다.

B 는 시스템을 상태공간 표현법으로 표현 했을 때 제어입력 행렬이고 P 는 식(6)의 Riccati 방정식의 해행렬이다.

$$PA + A^T P + Q - PBR^{-1}B^T P = 0 \tag{6}$$

그리고 이 상태피드백 제어계의 블록선도는 Fig. 2와 같다.

이 제어기법은 모든 상태를 모두 계측가능하다는 가정하에서 구성 가능하고 그렇지 못할 경우에는 관측기(observer)를 이용하여야 한다. 또한 이 기법은 모델의 불확실에 대처할 수 있는 능력, 즉 강인성이 없기 때문에 시스템의 변동이나 외란 등

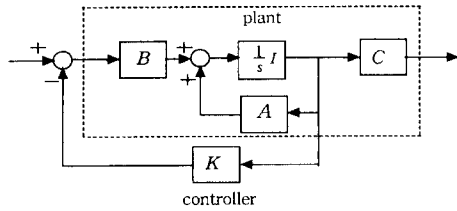


Fig. 2 Control system with state feedback

에 만족스러운 성능을 발휘하지 못하였다. 그런데 1970년대 후반에 M.G Safonov 가 특이값(singular value) 개념을 도입하여 다변수 제어시스템에 대해서도 단일 입출력 시스템에서와 같이 안정도-강인성 문제를 고려할 수 있다는 연구를 발표함에 따라, LQ 제어기법을 보완하는 한 방법으로 제안된 제어기 설계 기법이 LQG/ LTR (Linear Quadratic Gaussian control with Loop Transfer Recovery)이다.

이 LQG/LTR기법은 LQ 제어이론과 Kalman filter 이론을 이용한 모델 기준보상기(MBC ; Model Based Compensator)구조를 하고 있다.

현대제어 이론으로는 최적제어 이외에도, 적응제어(Adaptive control), 퍼지제어(Fuzzy control) 및 뉴럴 네트워크(Neural Network) 제어기법 등이 있으나 여기서는 이에 관한 설명은 생략한다.

다시 화제를 선형 제어기법으로 되돌려 강인성에 대해 설명하고자 한다. 고전제어 이론은 제어대상이 단일 입출력으로 한정되기는 하지만, 주파수 영역에서의 설계법으로 개인여유와 위상여유를 적당한 값이 되도록 설계함으로써 모델의 불확실에 그런대로 대처 할 수 있었다. 그러나 최적제어 기법으로 설계된 제어기를 실제로 제어대상에 적용할 때, 가장 큰 문제점으로 대두된 것이 강인성 문제였다는 것은 앞에서 설명한 바 있다.

이러한 관점에서 출발하여 전달함수 표현법과 상태공간 표현법과의 관계를 맺은 제어이론이 기약분해 표현에 의한 제어이론으로서, 이것은 고전제어와 현대제어를 융합시키는 계기가 되었다.

시스템의 수학적 모델링에는 반드시 모델링 오차가 수반되며, 이 모델링 오차에 대해서도 제어계

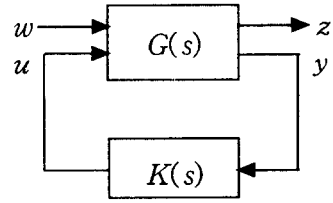


Fig. 3 H_{∞} Control

가 바람직한 성능을 갖도록 제어기를 설계하기 위해서는 주목하는 입 출력의 비(比)의 평균치를 평가기준으로 하는 것 보다는 최대 피크(peak)치를 평가 기준으로 하는 것이 타당하다고 볼 수 있다. 이러한 관점에서 비롯된 제어기법이 1981년 G. Zames 에 의하여 제안된 H_{∞} 제어기법이며, 그 블록선도는 Fig. 3과 같이 표현된다.

이는 식(7)을 만족하는 제어기 K를 구하는 문제이다.

$$\| T_{zw}(G,K) \|_{\infty} < \gamma \tag{7}$$

여기서, T_{zw} 는 w에서 z까지의 페루프 전달함수 행렬, G는 하중함수를 포함하는 일반화 플란트(Generalized plant), K는 제어기이다. 그리고 $\| \cdot \|_{\infty}$ 은 무한대 노름(norm)을 표시한다.

1988년에 K. Glover 와 J. C. Doyle 이 H_{∞} 제어 문제의 해법을 발표하면서부터, H_{∞} 제어 기법의 응용은 대단히 활발히 이루어지고 있다. H_{∞} 제어기 설계 기법으로 모델의 불확실에 대처할 수 있는 제어기를 구하고자 할 때는 모델의 불확실에 대한 하중함수를 불확실보다도 크게 선정하여야 하는데, 모델의 불확실 행렬을 복수의 불확실로 이루어지는 대각행렬로 할 경우에는 비대각요소까지도 불확실이 존재하는 것으로 간주되어 하중함수 행렬이 필요 이상으로 크게 되어 제어기가 조잡해 질 수 있다. 또한 이 제어 기법은 로바스트 성능(robust performance)을 고려하지 못하는 단점도 있다.

이러한 점을 개선하기 위하여 제안된 제어기 설계 기법이 구조화 특이치 μ_{Δ} 를 이용한 μ -해석/설계법으로 현재 응용에 관한 연구가 활발히 진행되

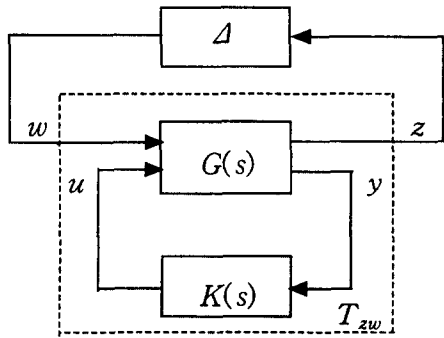


Fig. 4 μ - synthesis control

고 있다. 이 기법은

$$\mu_{\Delta}(T_{zw}(j\omega)) < 1, \omega \in R \quad (8)$$

을 만족하는 제어기를 설계하는 문제로서, 여기서 μ_{Δ} 는 구조화 특이치를 말하며 블록선도는 Fig. 4와 같다.

그리고 최근 철최적화(凸最適化 : convex optimization)기법을 이용한 제어계 설계법 중 LMI (linear matrix inequality : 선형 행렬 부등식) 기법이 있는데, 이 기법으로 상태 피드백 제어치를 설계할 경우, 대역적 최적해를 구할 수 있다는 점, 다수의 설계 사양을 쉽게 만족시킬 수 있다는 점, 대상 시스템의 파라미터 변동에 대한 강인성도 행렬 폴리토프(polytopic)에 의하여 보장될 수 있다는 점 등의 장점이 있어 이 기법의 적용에 관한 연구 또한 활발히 진행되고 있다.

6. 제어계 설계에 있어서의 앞으로의 전망

고전제어와 현대제어의 이론을 선형제어론을 중심으로 각각의 특징을 간략히 살펴 보았다. 21세기의 문턱에서 있는 현재, 과학의 발전은 급진전하고 있음은 주지하는 바이며, 이러한 시점에서 천학비재(淺學菲才)한 필자가 제어계의 미래를 전망한다는 것은 대단히 어려운 일이지만, 현재 상황

으로 볼 때 짧은 기간의 미래에는 강인성에 중점을 둔 제어기의 설계에 관한 연구가 계속 되어지리라고 본다.

그리고 컴퓨터 기술의 발달과 더불어 복잡한 제어 알고리즘도 쉽게 실현될 수 있으므로 뉴럴네트 워크 및 인공지능에 의한 제어 기술도 크게 발전될 것으로 생각된다.

한편 일반적인 제어기의 설계 순서는 대상으로 하는 플란트의 동특성을 고려하여 플란트를 수학적으로 모델링하고, 모델링된 공칭모델을 기초로 하여 제어기를 설계한 다음, 시뮬레이션 및 실험을 통하여 설계된 제어계의 타당성을 검토하여 불만족스러운 경우는 제어계를 재설계하거나, 나아가 모델링을 다시 하는 것이 통상적으로 이용되어온 설계 순서였다. 이 경우는 플란트의 모델링 과정과 제어기 설계 과정이 완전히 독립적으로 이루어졌다.

그러나 최근 모델링과 제어기 설계의 불가분(나눌수 없음)성이 제기되면서, 시스템의 동정(identification)과 보상기(compensator)의 통합화 설계 기법이 제안되고 있으며, 앞으로 이 연구 테마도 흥미있는 한 분야가 될 것으로 생각된다.

7. 참고문헌

- 1) 하주식, "自動制御工學", 海軍圖書出版部, pp18-22, 1986
- 2) 신중석, "응용자동제어", 상학당, pp11, 1985
- 3) 計測自動制御學會, "SICE 夏期セミナー'93", pp1-3, 1993
- 4) 吉川恒夫, 井村順一, "現代制御論", 昭晃堂 pp1-3, 1994
- 5) 荒木光彦, "21世紀の制御理論にむけて", システム/制御/情報, Vol 4. No.1 pp2-5, 1997
- 6) 美多勉, "H_∞制御", 昭晃堂, pp165-179, 1995
- 7) 市川邦彦, "制御理論について", 日本舶用機關學會誌, 第26卷 第12號, pp.654-660, 1991
- 8) 김영복, 변정환, 양주호, "선형 행렬 부등식을 이용한 내연기관의 제어", 어업기술학회지 Vol.33, No.1, pp59-67, 1997