□ 技術動向 □

대규모 시스템의 해석 및 제어에 관한 연구 동향

徐 一 弘*

차 례

1. 서론

대규모 시스템은 지역적으로 분리되어 있는 여러개의 부시스템들로 구성되거나 시스템의 차수가 매우 커서, 이의 해석 및 제어기의 설계에는 현재까지 사용되어 왔던 방법들, 즉 상태공간이나 입출력전달함수등을 이용한 시스템모델링, 가제어성, 가관측성 및 안정도등의 시스템의 질적성질을 판단하는 방법 및 안정화제어나 최적제어등의 시스템동작을 제어하는 방법들을 쉽게 적용키가 어렵다. 이에 대한 주이유는 위에 기술된 일련의 방법들이 시스템의 모든정보들이 한장소로 모이며, 정보처리가 이루어지는, 소위 "집중성 (Centrality)" 이란 가정을 전제로 이루어지기 때문이다.[1] 예를들어, Packet Switched 위성통신문제 [2]의 경우를 생각해 보기로 하자. 설명의 편의상 통신위성의 채널은 한개이고, 이통신위성채널을 사용하고자하는 지상통신국의 수가 N개이며, 각 지상통신국은 한개의 packet 만을 저장할 수 있는 버퍼 (Buffer)를 갖는다하자. 이때 한지역의 통신국이 채널을 사용키위해서는 다른 (N-1)개의 통신국중 어떤하나라도 같은시간에 채널을 사용하는지를 알아야 한다. 이를 위해서는 모든 통신국의 상태를 한곳에 집중시키어 채널 사용권을 결정할수있으나 이는 실제로 불가능하다. 그러므로 각지역통신국은 packet정보를 채널에 송신할 것인가를 자체의 정보만을 이용하여 결정하여야 하는데, 대개는 현재의 통신국상태와 현재부터 packet정보를 채널에 보내어 사용권을 알아보는데에 걸리는 전파전송시간 d 이전의 정보 (즉, 시간지연된 상태) 등을 이용하여, 통신국자체가 정보누증으로 인한 Blocking 현상과 채널에서 정보가 수신 거절되는 현상을 최소화하도록하는 의사결정, 즉 비집중정보에 의한 의사결정을 행한다. 이와같은 대규모시스템의 해석 및 제어의 어려움은 비단 통신시스템 뿐 아니라, 교통시스템[3],[5]전력시스템 [4] 산업제어시스템 [6] 및 경제시스템 [7] 등에서도 볼 수 있으며, 이는 비집중화 해석 및 설계방법의 연구를 유도케되었다. 실제로 최근의 마이크로프로세서등의 가격저하 및 기술진보는 각 부시스템에서 정보를 분산처리 하는 것을 가능케 하였다. 그렇지만 비집중화해석 및 이론의 적용이 어려워 [1 - 34] 에서 보는바와 같이 많은 연구가 진행되어 왔으며, 대개 [1] 에서 같이 이들 연구분야를

1) 모델 단순화
2) 안정도 검사
3) 비집중 제어
4) 계층적 최적제어

등으로 구분할 수가 있다.

본고에서는 [1] 의 내용을 토대로 각연구분야의 특징 및 동향을 기술하기로 한다.

* 正會員 : 大宇重工業㈱技術硏究所 電子技術硏究部

2. 모델 단순화

모델 단순화연구는 단순화된 모델을 이용할 경우 제어시스템의 시뮬레이숀, 해석 및 설계에 관련된 계산을 줄일 수 있다는점과 단순화된 모델은 간단한 제어시스템구조를 이룰 수 있어 실제 구현하기가 용이하다는점등에서 시작되었던바, 그접근방법은 Aggregation 방법과 Perturbation 방법으로 구분할 수가 있다.

Aggregation 방법의 개념은 대상시스템의 성격을 규정하는 모우드(mode)들 중에서 시스템 전체에 지배적인 영향을 주는 모우드들 만으로 시스템을 축소하는것이다. 이방법의 효시는 Malinvaud [8]에 의한것으로서 그림 1의 다이어그램(diagram)으로서 설명할수가 있다. 그림 1에서 f는 χ역영에서 Y영역으

$$\begin{tikzcd} x \arrow[r, "f"] \arrow[d, "g"'] & y \arrow[d, "h"] \\ x^* \arrow[r, "f^*"'] & y^* \end{tikzcd}$$

그림 1. 축소방법을 설명키 위한 다이어그램

로 사상시키는 함수(시스템)이며 g와 h는 각각 χ영역에서 축소된 영역 χ^*와 Y영역에서 Y의 축소된 영역Y^*로 사상시키는 함수이다. 이때 $f^*: \chi^* \to Y^*$가 바로 축소된 모델을 나타내는 시스템표현으로 생각할 수 있다. 여기서 f^*가완전축소(perfect aggregation)이기위해서는 $hf = f^*g$ 의 관계가 성립되어야하나, 실제 이와같은 f^*를 찾기위하여서는 h가 제한되어야하는 어려움이 있어, [8]에서와 같이

$Y^* = hf(x)$라 할때

$$J = t_r E\left\{ (f^*(x^*) - y^*)(f^*(x^*) - y^*)T \right\}$$

를 최소화하는 f^*를 찾는방법을 시도하고 있다. 이와같은 개념적인 Aggreation 방법을 선형동적시스템에 적용시켰을때로 유추하면 다음과 같다. 축소대상 시스템 S_1 이

$$S_1 : \dot{x} = Ax + Bu$$

로서 주어질때 u가 속한영역이 χ, x가 속한 영역이 Y이며, S_1의 축소시스템 S_2

$$S_2 : \dot{z} = Fz + Gu$$

라 할때 u가속한 영역이 χ^*이고 z가속한 영역이 Y^*가 된다. 이때 $z = Cx$라면 f, g, h, f^* 는 각각 $(sI-A)^{-1}G$, I(identity), C, $(sI-F)^{-1}G$ 에 해당된다. 그러므로 f^*를 찾는 문제는 $hf = f^*g$로 부터

$$C(sI-A)^{-1}B = (sI-F)^{-1}G \quad (1)$$

를 성립시키는 F와 G를 구하는문제가 된다. 여기서 F의차원이 A의차원보다 작음을 주목하면 $C(sI-A)^{-1}B$는 pole-zero 상쇄가 있어야함을 알 수 있고, 따라서 주어진 A, B에 대해 C의선택이 제약을 받음을 알 수 있다. 이와같은 제약은 여러가지 문제를 이야기시키는바 이중 특기할 것은 C를(1)식을 만족시키도록 할 경우 축소상태변수 z $(= Cx)$가 물리적인 의미를 잃어버릴 수 있다는 점이다. 이러한 이유로 인하여 앞서 개념적으로 설명한바 같이 C를 z가 물리적인 의미가 있도록 선택하여, z를 $y = \alpha^{-1}[C(SI-A)^{-1}B]$에 가깝도록하는 적절한 성능지수를 최소화하는 F와 G를 선택하는 방법을 사용한다.[1]

이상에서 설명한 Aggregation 방법의 개념 이외에 문제점 및 향후연구과제등은 [1]을 요약하여 표 1에 정리하였다.

Perturbation 방법의 개념은 대상시스템에 존재하는 상호간섭작용을 무시하여 시스템을 축소시키는 것인바 이에는 약결합(weak coupling)방법[9][10]과 강결합(Strong Coupling)방법[12][13]등이 있다. 먼저 약결합방법을 설명키위해 다음의 동적시스템을 생각한다.

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & \varepsilon A_{12} \\ \varepsilon A_{22} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_1 & O \\ O & B_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

식(2)에서 ε이 충분히 작다고 가정할때 두개의 작은 차수를 갖는 독립적인 시스템으로 분리되어 이익해석 및 제어기의 설계는 차수의 선형적증가에 비해 계산의 복잡성은 더빠른 비율로 증가하기 때문에 ε을 고려할때 보다 용이하게 된다. 이러한 이유로 약결합 방법에서는 먼저 ε을 영으로하여 해석 및 설계를 행한 후, $\varepsilon \neq 0$인 실제시스템에의 근사정도를 양적으로 규정하는 시도를 행한다.[9][10]

약결합구조를 갖는다고 사료되는 실제 시스템중에 산업용로보트시스템이 포함된다고 생각된다. 로보트 제어에 관한 많은 연구가 각구동축만의 비선형적 상호간섭을 고려하여 진행되고 있으나 [11] 실제 기어

표 1. 대규모 제어시스템 해석 및 설계에 관한 연구분야 개요

1) 연구분야	2) 주 연구동기	3) 주 연구방법	4) 장점 및 문제점	5) 연구과제 및 기타
가. 모델 단순화	1. 제어시스템의 시뮬레이숀, 해석 및 설계에 있어서 복잡한 계산을 피할 수 있음 2. 단순화된 모델로부터 간단한 제어법칙을 유도할 수 있음	ㄱ) Aggregation (축소) 방법	완전 축소의 경우 : ① 계산상의 부담을 덜 수 있음 ② 간단한 제어법칙을 유도할 수 있음 ③ 축소상태 변수가 물리적인 의미를 잃어버릴 수 있음 →간단한 제어법칙의 의미가 없어짐 불완전 축소의 경우 : ① 해석은 차원이 줄어 간단함 ② 유도된 제어법칙의 효율성은 근사 정도에 의존함	시스템 차수를 축소시키는 이외에, 축소상태를 선택하는 조건으로서 a) 센서 특성 b) 외란 특성 등을 고려하는 성능지수의 선택 방법
		ㄴ) Perturbation 방법	① 계산부담을 줄일 수 있음 ② 실제의 시스템이 slow, fast 모우드로 분리되고, ε이 explicit하게 나타나는 경우가 드물어, 시간차원으로 분리가능토록 모델링 하기 위해서는 많은 물리적 고찰이 필요함	a) 이산시간 시스템의 적용 b) Multi rate Sampled data 시스템의 응용
나. 안정도 검사	차수가 높고 여러 부시스템으로 구성된 대규모 시스템의 안정도 검사를 각 부시스템만의 안정도 검사로서 대치시킴으로서 계산상의 이점을 얻을 수 있음	ㄱ) Liapunov방법 i) 벡터 Liapunov 방법 ii) Weighted sum Liapunov 방법	① 각각의 부시스템의 Liapunov 함수만 고려하면 됨으로 다른 부시스템의 모델을 고려할 필요가 없다. ② 안정도 검사가 각 부시스템의 Liapunov 함수 및 상호 간섭작용의 크기만을 알면 됨으로 전체 시스템의 자세한 구조를 알 필요가 없다. ③ 비선형 시스템의 경우 Liapunov 함수 선택이 어려우며, 간섭이 약한 경우만 사용 가능 ④ 모든 부시스템이 분리되어 있어야 가능함으로 overlapping 시스템에 적용키 어려움	a) 상호작용에 시간지연이 있는 경우가 대규모 시스템이 많이 존재하므로 이에 대한 효과적인 안정도 검사 방법 b) overlapping 부시스템을 갖는 대규모 시스템에 적용 연구
		ㄴ) 입출력(I/O) 방법	① Liapunov 방법에 비해 적용범위가 넓어 덜 보수적임 ② 비선형 시스템에 적용키가 상대적으로 쉬움	* Liapunov방법과 I/O 방법의 비교는 표 참조
다. 비집중 제어	집중제어가 경제적 및 물리적인 제약 등의 이유로 불가능하여, 각 부시스템들의 제어장치는 자신이 속한 부시스템만의 정보를 이용하여 전체 시스템을 제어한다.	ㄱ) 비집중 스토케스틱 방법	각 부시스템에서 관측 가능한 출력정보가 시스템 전체의 출력정보가 아닌 것을 비고전적 정보형태라 하며, 이 때 각 부시스템의 출력정보만으로 구성되는 제어기를 자능형 성능지수를 최소하도록 구하는 것이 본래 목적이나, ① 비고전적 정보 형태에 있어서 제어기 구조가 비선형적이어야 하고 ② 비선형적 제어기는 찾는다 해도 구	

			현이 어려우며 (3) 제어기 성능이 시스템의 변화에 지극히 민감하다는 어려움으로 제어기를 선형구조이며, 상태 예측자의 구조를 확정시킨 후 변수최적화 문제로 바꾸어 품, 따라서 (4) 상태 예측자의 구조의 선택 방안이 모호함	
		ㄴ) 비집중 안정화 제어 i) 출력궤환을 이용한 극배치 방법	(1) 1개의 제어기로서 가제어성, 가관측성을 갖도록 할 때, 어떤 모우드는 비실제적으로 큰 이득의 경우에만 원하는 위치에 옮길 수 있음 (2) 대규모 시스템의 모든 모우드의 제어를 하나의 부시스템이 담당함으로 인한 제어장치의 복잡성 (3) 연결 안정성을 잃어버릴 수 있음	a) Fixed Hode가 있는 시스템의 경우로 확장
		ii) 상태궤환제어 방법	일반적으로 적용가능한 수학적도구의 미비로 비집중 안정화를 위한 충분조건의 제시만이 이루어지고 있음	a) 이산시간계의 적용 b) 시간지연 시스템의 적용 c) 필요 충분조건의 유도 가능성
		ㄷ) 비집중 준최적 제어 i) 이득행렬 비집중화 방법	비집중 제어기의 구조를 최적 집중제어 이득행렬을 근거로 결정하게 됨에 따라, 공간적, 시간적으로 분리되어 있는 부시스템들을 하나의 부시스템으로 간주할 경우가 발생	a) 큰 차수의 대수적 Riccati 방정식을 효율적으로 풀수 있는 신뢰성 있고 빠른 알고리즘의 구현
		ii) 변수최적화	제어기 구조 자체를 부시스템을 근거로 이루어지므로 시스템 전체가 연결 안정성을 갖도록 할 수 있음	
라. 계층적 최적제어	대상 시스템의 차원이 커서 기존의 최적제어 방법으로는 해를 구하기가 어려움	ㄱ) Dual Decomposition ㄴ) Interaction-Prediction		수렴속도가 빠르게 하도록 하는 Coordinator의 설계

(gear) 등에의하여 상호간섭작용이 매우적은것으로 사료되며, 현재까지 상품화되어 판매되고 있는 일본의 로보트제어장치의 경우 상호간섭을 무시하고 설계된 것으로 사료된다.

이제 강결합방법을 기술키위해서 다음의 시스템을 생각한다.

$$\dot{x}_1 = A_{11}\ x_1 + A_{22}\ x_2 \quad \text{(Slow System)}$$

$$\varepsilon\ \dot{x}_2 = A_{21}\ x_1 + A_{22}\ x_2 \quad \text{(Fast System)}$$

식(3)에서 $\varepsilon = 0$ 라할때, 즉 Fast System의 동특성을 무시할때, 전체시스템은 x_1의 차수로서 축소된다. 그러므로 시스템해석이 간편해질 수 있다. 본방법은 약결합방법에서와 같이 공간 차원을 분리하여 (약결합구조의 시스템의 경우 대개 지리적으로 분산된 부시스템으로 구성됨) 독립적인 부시스템을 해석하는것이 아니라, 서로 다른 시간 차원 (different time scale /Multiple Time Scale)에서 움직이는 시스템을 분리하여 해석을 하는 방법이라고 생각할 수 있다. 강결합구조를 갖는 수학적모델을 실제시스템으로부터 유도하는데에는 매우 어려운 것으로 알려져 있으나 [1]

일단 유도가 된 후에는 해석하기가 용이하고, 계층적 구조로 필터 및 제어기를 설계할 수 있어 매우 매력적인방법이라 볼 수 있다. 또한 시간차원을 분리하는 개념으로 미루어, 서로다른 표본주파수 (Sampling frequency) 를 이용하는 실제의 산업제어시스템의 해석 및 설계에 응용가능하다 (multirate Sampled data System 의 설계에 응용가능함을 의미함) 。

강결합방법의 자세한사항은 [1] 을참조 바라며, 표 1 에 문제점 및 향후 연구과제등을 요약하였다.

3 . 안정도 검사

대규모 시스템의 안정도 검사연구는 서론에서의 언급한 바와같이 집중성을 가정한 기존의 안정도판별 방법을 대규모시스템에 적용키어려워 출발되었다. 예를들어 다음과 같은 선형시스템의경우, 즉

$$\dot{x} = Ax \tag{4}$$

의경우, A의 차수가 매우크면 A의 eigenvalue 를 구하여 안정도를 판별하는 기존의 방법이 적용되기가 매우어렵다. 이를 해결키위해 많은 연구 [14]~[18] 가 진행되었는바,

첫째, 대상시스템은 여러개의 부시스템으로 분리구성 되어있으며, 각부시스템의 동적모델 및 상호간섭작용을 나타내는 모델이 이용가능하다.

둘째, 각부시스템은 독립적으로 분리되어 있을때 안정하며, 각부시스템의 안정도를 표시하는 양적지표 (예 : Liapunov 함수가 감소하는 비율의 최저한계) 가 이용가능하다 라고하는 두가지 가정하에서,상호간섭작용의 크기 (예 : Matrix 의 norm) 을 정의하여 , 상호간섭작용이 어떤한계치 이하이면, 전체시스템이 안정하겠는가 하는 조건을 유도하는 방향으로 이루어지고 있으며, 이에는 벡터 및 weighted sum Liapunov 방법 [14][15][16] 과 입출력방법이 있다.

벡터 Liapunov 방법은 고립된 부시스템들이 안정하다는 가정으로부터, 각부시스템의 양부호의 스칼라함수인 Liapunov 함수 V_i 를 상호작용을 고려한 부시스템의 상태궤적에 따라 미분하여 $\dot{V}_i \leq -\sum e_{ij} V_j$ 를 얻고 이들의 e_{ij} 로 이루어지는 부시스템들의 갯수의 차원을 갖는 행렬의 안정도검사에 의하여 대상시스템의 안정도를 판별하는 방법이며, weighted sum Liapunov방법은 앞서 기술한 벡터Liapunov 방법에서 각 부시스템의 Liapunov 함수에 각각 양부호의 weighting factor를 곱하여 이들을 합한 것을 원래 시스템의 Liapunov 함수로서 추정하고 해석하는 방법이며 weighting factor를 모두 1로 할경우 벡터Liapunov 방법이 되는 것으로서 벡터Liapunov 방법의 확장된 개념이다.

입출력방법은 그림 2 와 같이 구성된 시스템에 대하여 H_{ij} 와 B_{ij} 의 이득을

$$g(F) \triangleq \sup \left\{ \frac{\| Fx \|_p}{\| x \|_p} \right\}$$

에 의하여 구하고, $g(H_{ij})$와 $g(B_{ij})$를 각각 요소로 하는 $k \times k$ 행렬 $G(H)$와 $G(B)$를 구한후, $I - G(H)G(B)$ 가 Metzler 행렬 [34] 인 가를 판별하여 Metzler 행렬이면 대상시스템이 안정하다고 판정하는 방법이다.

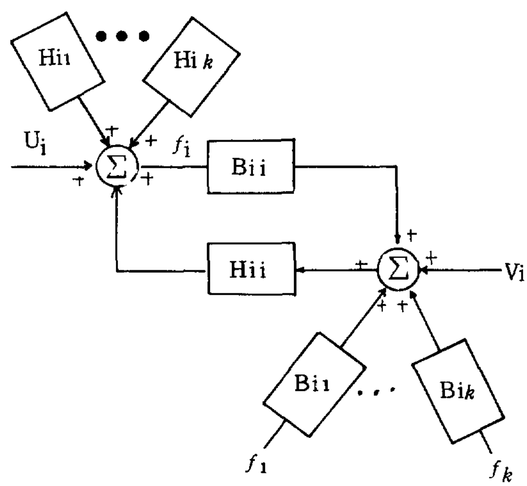

그림 2 . i 번째 부시스템의 입출력 관계

이상에서 기술한 각방법의 문제점 및 향후연구방향 등은 표 1 에 수록하였으며, 방법의 비교는 표 2 [14] 에 기술하였다. 여기에서 한가지 언급하고 싶은점은 위에 기술된 방법에 의하여 시스템이 안정하다고 판별될때, 이시스템은 [34] 에의해 정의된 바와같이 연결적안정 (Connective Stability) 하다는 것이다. 즉 전체 시스템동작중 어떤 부시스템들이 고장등의 이유로 동작을 멈추더라도 남은 부시스템들로 이루어지는 전체시스템은 안정하게 동작한다는 것이다. 이러한 연결성 안정성은 약결합구조의 시스템에 많이 볼 수 있는 것이며 강결합구조의 시스템경우 상호간섭작용이 오히려 시스템을 안정하도록 하는 작용을 할 수 있음을 고려하면 상호간섭작용을 적극적으로 고려하면서도 전체시스템의 안정도를 용이하게 판별할 수 있는 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

표 2. Liapunov 방법과 I O 방법의 비교

	Liapunov 안정도	입출력 안정도
기본적 기법	Liapunov 방법	소이득 정리 (Small Gain Theorem)
부시스템에서 알아야 하는 사항	Liapunov 함수 u_1	이득
상호간섭에서 알아야 하는 사항	순간한계치 (Instantaneous Bounds)	함수적 한계치 (Functional Bounds)
안정도 판별 조건을 유도하는 방법	$\frac{d}{dt}\sum_i d_i v_i$가 negative definiteness 를 갖도록 하는 d_i의 존재여부	각부시스템 상태 변수 z_i에 대한 norm 즉 $(d_1^2 \Vert z_1 \Vert^2 + \cdots + d_n^2 \Vert z_n \Vert^2)^{1/2}$ 에 대하여 소이득 정리가 성립되는 d_i의 존재 여부
Test 방법	Metzler Matrix 검사	

4. 비집중제어

대규모시스템의 비집중제어에 관한 연구는 집중제어를 택할시, 모든 부시스템 정보의 집중화를 위한통신망 설치비용 및 복잡한 통신망으로 인한 신뢰도저하 등의 문제를 해결키위해 진행되어 왔다. 이에는 비집중 스토캐스틱 제어방법 [19], 비집중 안정화제어방법 [20]~[30]및 비집중 준최적제어방법 [31],[32] 등으로 크게 구분할 수가 있다. 본절에서는 비집중 스토캐스틱제어에 관하여서는 표 1의 요약으로 대신키로하고, 비집중 안정화제어 및 준최적제어에 관하여 비교적 상세히 기술하기로 한다.

비집중 안정화 제어에 관한 연구는 각부시스템의 제어기의 이용가능한 정보를, 각 부시스템의 출력정보로 한정하는 비집중 출력궤환제어방법 및 각 부시스템의 상태정보로 한정하는 비집중 상태궤환제어에 관한 연구로 진행되어 왔다. 먼저 비집중 출력궤환제어방법을구체적으로 고찰키위해 다음과 같이 k개의 부시스템으로 구성된 선형 동적시스템을 생각한다.

$$\dot{x} = Ax + \sum_{i=1}^{k} B_i U_i$$
$$y_i = C_i x \tag{5}$$

식(5)에서 비집중 출력궤환 제어를 위하여 각부시스템의 제어기를

$$u_i = M_i z_i + F_i y_i$$
$$\dot{z}_i = H_i z_i + L_i y_i \tag{6}$$

로 한다. 이때 비집중 극배치에 의한 안정화문제가 의미를 갖기위해서는 식(5)의 시스템이 모든 제어기, 즉 $u_1, \cdots, u_k$로부터 가제어성을 가지며, 모든 출력, 즉 $y_1, \cdots, y_k$로부터 가관측성을 갖는 반면 어떤한 단독의 부시스템으로 부터는 가제어성 및 가관측성을갖지 않는다는 가정을 필요로 한다. 이와같은 가정하에 wang Davison [20] 및 Corfmat 과Morse [21] 가 전체시스템이 안정하도록 극배치를 하기위한 방법을 제시하였다. 이들방법의 개념은 간단한 것으로서 k개의 부시스템중 어느하나를 선택하여, 나머지 부시스템들의 제어장치들을 선택된 부시스템에서 전체시스템이 가제어성 및 가관측성을 갖도록 설계한 후, 남은 한개의 선택된 부시스템에서 전체시스템을 안정하도록 하는 극배치 문제를 푼다는 것이다. 이의 개념을 인간의 집단에 적용할 경우 그집단의 소속원들은 집단의 대표를 선정하고, 선정된 집단의 대표가 성공 할 수 있도록 개인의 영리를 고려치 않고 조력하여 결국 집단의 대표가 전체를 유익하게하여 소속원에게도 이익이 배분되게하는것과 합치한다고 사료된다. 여기서 문제는 이러한 집단자체가 위에 기술된 목적을 이룰 수 있는가에 있다. 식 ⑤의 시스템에서보면 과연 한개의 선택된 시스템의 입출력에서 전체시스템의 가제어성 및 가관측성을 갖게끔 할 수있느냐의 문제인바, Wang 과Davison [20]은 이의 판별 방법으로써 Fixed Mode 의 개념을 도입하여 사용하였고 Corfmat 과Morse [21]는 그라프이론에서 사용되는 Strong connectedness개념을 사용하였다. 구체적인 설계방법 및 적용예는 [20]와 [21]를 참조 바란다.

이상의 비집중 출력궤환 (상태관측자 사용)을 이용한 극배치로서 안정화를 시키는 방법은 표1에서 보는 바와같이 첫째, 한개의 제어기로부터 가제어성 및 가관측성을 갖도록할때 어떤 mode는 비실제적으로 매우큰 이득상수로서만 원하는 위치에 옮길 수 있다는 어려운점, 둘째, 대규모시스템의 모든mode 의 제어를 한개의 부시스템이 담당하게 됨에따르는 제어기의 복잡성, 셋째, 연결성 안정성을 잃어버릴 수 있는점 등

에서 비판을 받을 수 있으나, 현재까지도 많은 연구가 진행되어 오고 있다. 이중 흥미로운 것은 대상시스템이 Fixed Mode 를 갖는 경우 본 방법에 의하여 안정화시킬 수 없는 어려움을 해결하려는 시도로서, wang [22] 이 제한하였는바, 주요개념은 시변이득 (time varging)을 이용하여 Fixed mode 를 제거 한다는 것이다.

이제 비집중 상태궤환제어에 관하여 기술하기로 한다. 이를 위해 다음과 같은선형 동적시스템을 생각한다.

$$\dot{x}_i = A_i x_i + \sum_{j=1,\, j\neq i}^{k} A_{ij}\, x_j + B_i u_i \tag{7}$$

식(7)에서 문제는 각부시스템의 제어기 u_i의 이용가능한 정보를 자신이 속한 부시스템의 상태정보 x_i 만을 이용하여 전체시스템을 안정화 시킬 수 있는가 하는 것으로서 최초의 시도로 여겨지는 것은 1973년에 AoKi 와Li [23]에 의한것인바, 식(7)의 시스템이

① (A_i, B_i)가 모든 i에대해서 가제어성이 있으며

②전체 시스템이 가제어성을 갖는다. 즉 A_{ij} 를 블록요소로 하는 시스템행렬 A와 B_i를 블록요소로 하는 시스템 입력행렬 B사이에

$$rank\,[A \;\; AB \cdots A^{N-1} B] = N$$

$$N = \sum_{i=1}^{k} n_i$$

가 성립한다는 두가지 가정을 만족하면 가능할것이라고 제안하였다. 그러나 이는 같은해에 Wang [24] 에 의해서 $k=3$ (부시스템이 3개 존재하는 것을의미함)인 경우 성립하지 않음을 보였는데, 이때 Wang은 성립하지 않는 예를 만들었으며 Fixed mode를 도입하였다. 한편 Fessas [25]는 Wang 의 예를 인용하여 가정 ①과②가 충분조건이 될 수 없는 시스템이 Strong connectedness 의 성질을 갖지 않기 때문이라고 주장하고 가정① 및 ②에 Strong connectedness 조건을 추가하면 충분조건이 된다고 제안하였다. 그렇지만 이제안은 Siljak과Ikeda [26] 에 의하여 성립되지 않음이 보여지었다. 여기서 이들은 strong connctedness는 비집중안정화를 위한 필요조건도 충분조건도 아님을 예를들어 보였으며, 아울러 fixed mode 가 존재치 않아도 비집중안정화를 이룰수없는 예도 제시하여, fixed mode 의 존재여부 또한 충분조건이 될 수 없음을 보였다. 이러한 일련의 비집중 상태궤환 안정화의 충분조건을 찾는 노력은 계속되어 1981년에 Sezer 와 Huseyin이 또하나의 충분조건을제안하였는바, 이를 살펴보면 연결안정성의개념을 확대적용한 연결 가제어성 (connective controllability)개념, 즉 식(7)의 k개의 부시스템을 갯수에 상관없이 어떻게 조합을하여도 조합된 시스템들은 가제어성을갖는다고 하는 개념을 도입하여, "주어진 시스템이 연결가제어성을 가지면 비집중 상태궤환에의한 안정화를 행할 수 있다"고하는 것이 그내용의 골자이다. 이에 대한 타당성을 많은 예를 통해서 기술하였으나, 아직까지 이론적으로 충분조건임이 확인되고 있지 않은 상태이며, 또한 이를 반박하는 예도 제시되지 않고 있는 것으로 사료된다.

이상에서 기술한 비집중 상태궤환제어를 이용한 안정화연구가 유한차원의 시스템에 국한된 반면, 시간지연요소가 존재하는 시스템 (대개 상호작용에 존재) 에 대한 비집중 상태궤환 안정화제어 연구도 진행됐는바 그예를 [28] , [29] 에서 찾아볼 수가 있다. 본 비집중 상태궤환 안정화 제어연구에 관련하여 한가지 언급하고 싶은 흥미로운 점은 Sezer Huseyin [27]이 주장하는 연결성 가제어성이 이산시간시스템의 경우에는 성립하지 않는다는 사실로서 자세한 것은 [30]을 참조바라며, 이산시간계의 비집중제어연구가 연속시간계의 비집중제어연구와 다른 차원으로서 진행되어야 할 것으로 생각된다.

이제 비집중 준최적제어설계에 관하여 기술키로한다. 이에는 두가지 시도가 있다고 사료되는바, 그중 첫째는 Hassan 과 Singh [32] 등에 의한 것으로서, 집중성 최적제어기의 이득행렬을 먼저구한 후, 이득행렬의 요소중 그크기가 상대적으로 작은 것을 무시하여 비집중 제어기의 구조를 결정한 후 이에 대해 다시 변수최적화를 행하는 시도이며, 둘째는 앞서 기술된 비집중 안정화제어의 이득행렬중 자승형 성능지수를 최소화하는 이득행렬을 찾기 위하여 변수최적화를 시도하는 방법 [31]이다. 양방법 공히 큰차수의 대수적 Riccati 방정식을 효율적으로 풀 수 있는 신뢰성있고 빠른 알고리즘을 요구하나, 현재까지는 이와같은 소프트웨어가 이용가능하지 않은것으로 알려져있다.[1]

5. 계층적 최적제어

계층적 최적제어에 관한연구는 대상시스템의 차원이 커서 기존의 최적제어 방법으로는 실제로 그해를 구하기가 어려워 진행되고 있는 것으로서, 먼저 각부시스템 차원에서 부시스템에 할당된 성능지수를 최적화한 후, 이들 최적화된 부시스템들의 정보를근거로 하여 각부시스템의 제어기들을 협조시키는 역할을 담당하는 조정자 (coordinator)를 설계하는 것이 이 방법의 기본적인 개요이다. 좀더 기술적으로 설명키위

해 다음과 같은 최적제어문제를 생각한다.

문제 1 : $\dot{x} = F(x, u, t)$, $x(t_o) = x_o$ (8)

로서 주어진 시스템에 대하여

$$u \in U(x,t) = \{ u \mid q(x,u,t) \leq o \} \quad (9)$$

의 제약조건하에서

$$J = \int_{t_o}^{t_1} c(x,u,t)\, dt \quad (10)$$

를 최소화하는 u를 구하라

문제 1 로서 주어지는 최적제어문제는 식(8)의 차원이 클경우 해를 구하기가 매우 어렵다. 이러한 어려움을 해결키위해 문제 1은 분리성 (Separability) 을 가정하여 다음과 같이 개형성 된다.

문제 2 :

$$\dot{x}_i = f_i(x_i, u_i, t) + \eta_i(t), \quad i=1 \cdots, k$$
$$x_i(0) = x_{i0} \quad (10)$$

와같이 식(8)의 분해된 시스템에 대하여

$$\eta_i(t) = \sum_j g_{ij}(x_j, t)$$

$$\sum_i q_i(x_i, u_i, t) \leq o \quad i=1,2,\cdots,k \quad (11)$$

의 제약조건하에서

$$J = \sum_i \int_{t_o}^{t} c_i(x_i, u_i, t)\, dt \quad (12)$$

를 최소화하는 $u_i, i=1,2,\cdots, k$를 구하라.

문제 2 를 [1] 에서는 " global problem" P_G 라고 부르며, 주안점은 상호간섭작용변수 $\eta_i(t)$에 의해 문제 1 을 k개의 부분 최적문제로 바꾼것이다. 그렇지만 (11)의 상호연결작용 때문에 문제 2 의 형성만으로 문제가 해결 되지않는다. 그러므로 다음단계가 요구되어지는바, 이것이 바로 협조성 (coordinability) 을 고려한 문제 2의 분해 과정이다. 즉 문제 2의 P_G를 k개의 변수 $\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_k$를 도입하여 k개의 부문제들인 $P_1(\alpha_1) \cdots P_k(\alpha_k)$로 바꾸는 것으로서, 이때 $P_1(\alpha_1) \cdot P_k(\alpha_k)$의 해들 중에는 P_G의해가 포함되도록(imbedding) 문제 2 가 분해되어야만 의미가 있다.

이상에서 기술한 문제 2의 분해과정으로부터 P_G 해를 구하기위한 α를 반복적으로 구하는 알고리즘연구가 많이 진행되어왔으며 자세한것은 [1, 33]를 참조하기 바란다.

6. 결 론

지금까지 대규모시스템의 해석 및 제어기설계에 관한 연구개요 및 동향을 [1] 에서와 같이 시스템단순화 안정도검사, 비집중제어 및 계층적최적제어로 구분하여 기술하였는바, 대규모시스템 이론은 해석이나 혹은 설계에 있어서 문제를 여러개의 부문제들로 분해하는데에 그기초를 두고있으며, 소규모시스템에 적용되던 수학적기법을 부문제들에 적용시키는데에 국한되고 있다고 사료된다. 물론 이러한 시도자체가 대규모시스템을 이해하는데에 도움을 주나, [1]에서도 언급한 바와같이 보다 다른차원에서 문제를 조명해보는 시도가 필요할 것으로 생각된다. 사실 현재까지는 이용가능한 수학적기법 및 사고가 한정되어있어, 다른차원에서 문제의 조명이란 것이 시스템이론가에게 무척 추상적으로 느껴진다. 그럼에도 불구하고 [1] 에서 제시한 몇가지 시도될만한 문제들을 소개하기로한다.

첫째, 대규모시스템 제어를 위하여 제어기를 어떤구조로 택할 것인가의 문제로서 Sandell [1]등은 현재의 수학적기법이 비집중제어나 계층적최적제어에 적당한가의 여부에 의문을 제기하고 있다.

둘째, 최적제어문제를 다룰때 동적상태를 고려하는 전통적인 하나의 성능지수만을 고려치 않고

가) 통신망 설치비용

나) 신뢰성

다) 콤퓨터 인터페이스의 비용

라) 시간지연 정보의 값

마) 시스템 복잡성의 수학적측정

등을 고려하여 문제를 형성하고, 이를 다룰수있는기법을 찾을수 있겠는가 하는 것이다.

이상의 문제이외에도 여러가지 다른각도의 문제를 형성할 수 있을 것으로 사료되며, 본고의 내용이 대규모시스템을 연구하고자하는 분들에게 다소나마 도움을 줄수 있을것으로 기대하면서 결론을 맺고자한다.

참 고 문 헌

[1] N.R. Sandell et al.; "Suvey of decentralized control methods for large scale systems," IEEE Trans. Automat. Comtr., Vol. AC-23, pp. 108-129, 1978.

[2] F.C. Schoute; "Decentralized control in packet switched satellite communication," IEEE Trans.

Automat. Contr., Vol. AC-23, pp. 362-371, 1978.

[3] J.H. Lim, S.H. Hwang, I.H. Suh and Z. Bien; "Hierarchical optimal control of oversaturated urban traffic networks," Int. J. Contr., Vol. 33, pp. 727-737, 1981.

[4] E.J. Davision and N.K. Tripathi; "The optimal decentralized control of a large power system: lead and frequency control," IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. AC-23, pp. 312-324, 1978.

[5] 박은세, 임준홍, 서일홍, 변증남,"On modelling and hierarchical optimal control of urban traffic networks,"제 14 차 대한전기학회 계측 제어분과 학술발표회 논문집, 연세대학교, 1981.

[6] T.C. Bichel and D.M. Himmelblau; "The optional expansion of a chermical plant," in Handbook of Large Scale system Engineering Applications, M.G. Singh and A. Titli, Ed., North Holland: New York, 1979.

[7] D. MacFadden; "On the controllability of decentralized macro-economic system: The assignment problem," in Mathematical System Theory and Economics Vol. 1; H.W. Kuhn and G.P. Szegs. Ed., Springer-Verlag; New York, 1969.

[8] M. Aoki; "Some approximation methods for estimation and control of large scale systems," IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. AC-23, pp. 173-181, 1978.

[9] F.N. Bailey and H.K. Ramaprigan; "Bounds on Suboptimality in the control of linear dynamic system," IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. AC-18, pp. 532-534, 1973.

[10] P.V. Kokotovic; "Feedback deisgn of large linear systems," in Feedback Sytems, J.B. Cruz, Ed. New York: McGraw-Hill, 1972.

[11] 변증남, 서일홍, 황승호, "산업용로보트의 제어 및 관련기술과 연구과제," 대한전자공학회 잡지, 제 9 권 제 4 호, pp. 9-19,1982

[12] P.V. Kokotovic; "Seperation of time scales in modeling and control." 1975 IEEE Conf. on Decision and Control, Houston, 1975.

[13] P.V. Kokotovic and R.A. Yackel; "Singular perturbation of linear regulators: basic theorems," IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. AC-17, pp. 29-37, 1972.

[14] M. Araki; "Stability of large scale nonlinear systems – quadratic-order theory of composite system method using M-marices," IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. AC-23, p. 129-142, 1978

[15] D.D. Siljak; "Competitive economic systems: Stability, decompositon, and aggregation," IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. AC-21, pp. 149-160, 1976.

[16] A.N. Michel; "Stability analysis of interconnected systems," SIAM J. Contr., Vol. 12, 1974.

[17] E.J. Laslay and A. N. Michel; "Input-output stability of interconnected systems," IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. AC-21, pp. 84-89, 1976.

[18] M. Araki; "Input-output stability of composite feedback systems," IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. AC-21, pp. 254-259, 1976.

[19] N.R. Sandel and M. Athans; "Solution of some nonclassical LQG stochastic decision problems." IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. AC-19, pp. 108-116, 1974.

[20] S.H. Wang and E.J. Davison; "On the stabilization of decentralize control system," IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. AC-18, pp. 473-478, 1973.

[21] J.P. Corfmat and A.S. Morse; "Decentralized control of linear multivariable system," Automatica, Vol. 12, 1976.

[22] S.H. Wang; "Stabilization of decentralized control systems via time varying controllers," IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. AC-27, pp. 741-743, 1982.

[23] M. Aoki and M.T. Li; "controllability and stabilizability of decentralized dynamic systems," in Proc. 1973. JACC, pp. 278-286.

[24] S.H. Wang; "An example in decentralized control systems," IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. AC-23, pp. 938, 1978.

[25] P. Fessas; "A note on 'an example in decentralized control systems,' IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. AC-24, pp. 669, 1979.

[26] M. Ikeda and D.D. Sikjak; "Counter examples

to fessase conjecture," IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. AC-24, p. 670, 1979.

[27] M.E. Sezer and O. Huseyin; "Comments on decentralized state feedback stabilization," IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. AC-26, pp. 545-547, 1981.

[28] I.H. Suh; "A study on decentralized stabilizing controllers for large scale systems with time-delays," Ph. D. Dissertation, KAIST, 1982.

[29] I.H. Suh and Z. Bien; "A note on the stability of large scale systems with delays," IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. AC-27, pp. 256-258, 1982.

[30] I.H. Suh and Z. Bien; "On stabilization by local state feedback for discrete-time large scale systems with delays in interconnections," IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. AC-27, pp. 744-746, 1982.

[31] 오상록, 서일홍, 변증남, "대규모시스템을 위한 저감도 비집중 준 최저 제어기," 1982년도 대한전자공학회 추계 학술대회 논문집, pp. 181~184, 1982

[32] M.F. Hassan and M.G. Singh; "A hierarchical structure for computing near optimal decentralized control," IEEE Trans. syst., Man, and Cybern., Vol. SMC-8, pp. 575-579, 1978.

[33] M.G. singh and A. Titli, Systems: Deconposition, Optimization and Control, Pergamon Press; New York, 1978.

[34] D.D. Siljak, Large Scale Dyoamic Systems; Stability and Structure, North Holland, New York, 1978.

會 員 動 靜

李允種 會員 (前副會長・漢陽大工大教授)은 漢陽大學校 반월大學長에서 副總長으로 就任

成基梨 會員 (評議員)은 金星計電 常務理事로 昇進. 또한 럭키金星그룹社 任員級 海外市場調査團 一員으로 美國出張을 다녀옴

韓松曄 會員 (理事・서울大工大教授)은 超電導關係技術情報調査 수집차 2. 6～2. 19까지 約 2 週間 美國訪門

金基洪 會員 (前浦項支部長)은 浦鐵 뉴욕事務所長으로 轉補

張文鉉 會員 (浦鐵情報管理本部長)은 金基洪 會員의 후임으로 本學會 浦項支部長으로 被選

李殷雄 會員 (忠南大工大教授)은 카나다 몬트리얼에 있는 Mcgill Univ. 에서 6月 15日까지 留學中

金炳贊 會員 (成均舘大工大教授)은 成均舘大 自然科學擔當 副總長으로 就任

尹泰允 會員 (國民大教授)은 同校 教務處長으로 就任

白龍鉉 會員 (副會長・仁荷大工大教授)은 業務次 約 2 週 예정으로 1. 21～2. 5까지 日本訪門

鄭然澤 會員 (副會長・明知大教授)은 業務次 日本訪門(1月)

徐國哲 會員 (理事・光云工大教授)은 業務次 日本訪門(1月)

鞠相勳 會員 (評議員・朝鮮大工大教授)은 業務次 日本訪門(1月)

黃甲珠 會員은 韓國電力에서 太平洋建設 電算室 次長으로 옮김

本學會 特別會員인 綜合通信機器 Maker인 韓國電子通信株式會社(代表理事 姜晋求)는 半導體事業擴充에 따라 商號를 **三星半導體通信株式會社**로 變更