

# 현대 제어 이론을 이용한 원자력 발전소의 제어기술 현황과 전망

김 동 화

(대전산업대학교 제어계측공학과 교수)

## 1. 서 론

1942.12.2 Enrico Fermi가 세계 최초의 원자로 CP-1(Chicago Pile-1)을 가동시킨 후 약 10년 뒤인 1951년 EBR-1 BWR 원자력 발전소가 5MW의 출력으로 상업운전에 들어가게 되었는데, 이 상용 원자로가 가동되기 위해서 필요한 많은 자료는 실험용 원자로 CP-1과 CP-2 및 Hanford프르토늄 생산 원자로에서 얻어졌다.

일반적으로 자동제어계는 시스템의 안정성을 해치지 않고 적당한 보상기를 설계하기 위해 그 시스템만이 갖는 동특성(Dynamics)을 알기 위한 분석(Analysis)과 전체의 시스템이 주어진 목적에 맞는 제어계가 되도록 구성하는 것으로 제어시스템을 구분 할 때 오늘날과 같은 원자력 발전소의 제어계 설계 및 분석기술은 Nordheim이 현재와 같은 원자로 동특성 표현 기법을 도입 하므로서 급속히 발전하였다.

그후 원자력 발전소의 단일용량이 증가하고 이의 부하분담이 증가하면서 안전성, 경제성, 부하추종성, 전력계통 외란에 대한 속응성 등이 요구되어 Bellman의 동적계획법(Dynamic Programming), Pontryagin의 최대원리(Maximum Principle)등을 이용한 최적 반응도 제어, Xenon독작용 제어, 플랜트의 최적제어 등을 연구하게 되었다.

한편 최근에는 여러 가지의 현대제어 이론은 물론 퍼지나 신경망과 같은 비선형 제어방법을 이용해 이들을 해결하고자 하는 연구가 급속히 증가하고 있다[1-16].

원자력산업의 개발국인 미국, 캐나다등은 이러한 원자로 제어 및 관련시스템에 대한 중요성을 인식하여 많은 연구소와 대학이 공동으로 기초,응용연구, 실험등을 다방면에 걸쳐 이룩하였고[17, 47-49], 최근에는 현대제어 이론에 의한 연구가 단순히 이론으로서 만이 아닌 원자력발전소에 대한 실질적 응용문제를 활발히 연구중하고 있다[77-80].

또한 일본의 경우는 1956년 설립된 원자력연구소가 1957년 연구용 원자로를 도입하여 많은 실험적인 연구결과를 수행함으로써 1966년 상업운전에 큰 역할을 하였는데[17]

이 시기에 현대제어 이론을 이용한 연구결과가 많이 발표되었다. 그러나 우리나라의 경우는 원자력발전소의 대한 다방면에 걸친 기초자료 조사, 연구, 실험 등이 이루어져있지 않은 상태에서 원자력발전소가 도입되어 이에 대한 관련연구는 그다지 많지 않은 상태이나 최근 이들 문제를 다룬결과가 점점 증가하고 있는 추세에 있다[58,108-111].

따라서 이들의 응용에 대한 연구는 매우 제한적일 수밖에 없다.

본 원고에서는 가동율향상, 안전성확보 및 경제성 제고를 위해 현대제어 및 기타의 제어 기법을 이용하는 문제는 필연적일 수밖에 없으므로 원자력 발전소에 대한 현대제어 연구현황을 분석하여 향후 연구방향에 기여하고자 한다.

## 2. 원자력 발전소 제어기술 현황

### 2.1. 원자력발전소 제어계통

#### 2.1.1 개요

원자력 발전소의 제어방식은 시스템의 입,출력 관점에서

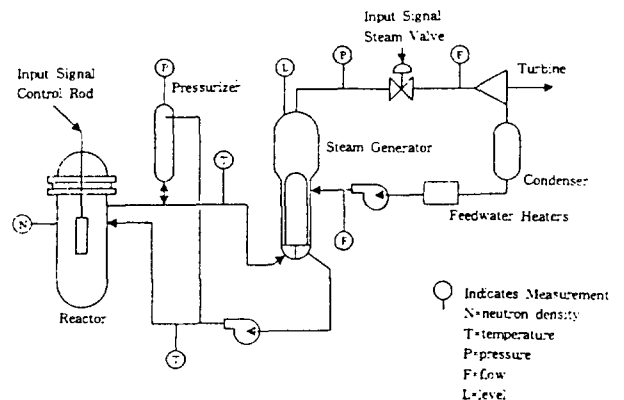


그림 1. 원자력 발전소 제어계통도

불때 터빈의 부하에 따라 원자로의 출력을 제어하는 방식과, 원자로의 출력에 부하를 제어하는 방식으로 구분할 수 있으나 최근에는 원자로의 부하분담이 커짐에 따라 부하 변동에 따라 원자로를 제어하고자 하는 연구가 많다(그림 1). 원자력 발전소의 제어계통을 요약하면 다음과 같다.

**2.1.2 원자로제어계**

제어봉의 위치를 자동으로 조정하여 원자로 출력을 제어하는 것으로 이 제어에는 2개의 입력신호를 이용한다. 즉 평균온도 편차신호(Tavg-Tref)와 출력편차신호(QT-QN)이다. 평균온도 편차신호는 1차 냉각재 온도 Tavg와 프로그램 된 기준온도 Tref와의 편차로서 냉각재 평균온도를 기준온도로 제어하기 위한 것이다.

냉각재 평균온도는 고압측 및 저압측의 평균온도를 검출하여 평균하고 프로그램 된 기준온도는 터빈 출력신호(조속단 압력)로 연산된다. Tref는 1차 냉각재 온도, 2차 증기 압력의 출력 의존성을 최적화하기 위해 QT에 비례하여 설정한다.

출력편차 신호는 터빈출력(QT)과 원자로출력(QN)의 차신호로 구성되어 있어 제어계의 응답을 빨리 안정시키는데 목적이 있다. 이와같은 신호를 받아 원자로는 출력제어(반응도제어), 제논 동작제어(Xe Spatial Oscillation, Startup, Shutdown 등)등을 하게 되는데 이의 자세한 기술은 제어란에서 다루기로 한다.

**2.1.3 가압기 압력제어계**

부하변동에 의해 1차 냉각재 온도가 변하면 이의열팽창 및 수축에 의해 가압기의 체적변화를 일으켜 가압기로 전달된다. 가압기 압력이 저하되는 히터로, 높을 때는 냉각수를 분사시켜 조절한다. 이 부분은 Suboptimal기법을 이용해 연구한 것이 많다.

**2.1.4 가압기 수위제어계**

1차 냉각재 평균온도의 출력에 의해 가압기 수위가 변화되어 제어가 이루어진다.

**2.1.5 증기발생기 수위제어계**

증기발생기 수위제어계는 통상의 보일러 수위제어에 이용되는 3가지 방식, 즉 수위, 증기유량, 급수유량의 신호를 이용한다. 수위를 터빈출력에 응하여 프로그램된 설정수위로 유지하도록 급수유량 제어변을 제어한다.

저출력시(15%출력이하)는 수위 신호에 냉각재 온도차 신호를 레환신호로 이용하여 2요소 제어 방식에 의해 주급수 바이패스변의 개도를 제어한다.

**2.1.6 터빈 바이패스 제어계**

주증기 일부를 복수기로 직접 바이패스 시킨다. 즉 10%를 초과하는 계단상 부하감소 또는 5%/min을 초과하는 램프상부하 감소시 주증기를 바이패스 시켜 원자로의 과도 응답을 방지한다.

또한 고출력 운전시 터빈 및 원자로의 트립시 바이패스

변을 가동시켜 2차측 압력상승을 억제한다.

이를 위해 신호는 1차측 냉각재 평균온도를 제어신호로 하고 기준온도와의 편차에 의해 바이패스변의 개도를 조정한다. 종래에는 일부 바이패스 방식을 채택했으나 100[%] 바이패스 방법을 목적으로 연구중이다.

**2.2 원자력발전소 제어기술의 역사**

1960년대 초반에 현대제어 이론이 제시되었기 때문에 원자력 발전소에 대한 제어이론은 상업운전에 들어간 1951년부터 1960년대 전반기까지는 주로 고전적인 이론이 적용되어 왔다고 볼 수있다. 1942년 12월 2일 인류 최초의 원자로(CP-1)가 가동 되었을 때의 제어는 한 사람이 제어봉을 손으로 제어하는 원시적인 방법 이었고[47], 이어 개량된 CP-2에서는 자동제어 장치의 설계, 분석을 위한 원자로의 동특성 해석, 주파수 응답특성, 전달함수등이 실험적으로 다루어 졌다[48,59].

그후 개발된 상업용 원자력발전소에서는 제어계 설계에 실험용 원자로에서 얻어진 동특성, 주파수응답, 전달함수등과 이 때 까지 주로 제어계를 지배하던 서보기구(Servomechanism), PID 제어기법등을 이용하였고, 현재 가동중인 대부분의 원자력발전소도 이범주를 벗어나지 않고 있다[82].

특히 원자력 발전소의 제어 및 자료분석에 가장 먼저 컴퓨터를 도입한 CANDU형의 경우도 제어기법은 종래의 고전적인 것에 속하고 있다.

1957년 Charles F.Bonilla[47-50]는 전시스템을 PID제어 했을 때의 제어동작과 정상상태시의 Sinusoidal response, 전달함수 주파수특성 등을 자세히 분석했고 Walter C. Lipinski[81]는 Liquid Metal Fast Breeder Reactor의 최적제어 시스템의 분석 및 설계에 현대제어 이론을 응용했으나, 현대제어 이론을 최초로 상용 원자로에 이용한 것은 1960년 Kallay[44]가 Nuclear Fuel Management와 Xenon Shutdown Program에 Off-line 상의 최적화기법을 도입한 것으로 볼 수 있다.

그러나 이것은 본란에서 다루고자하는 범주를 벗어나므로 이에 대한기술은 생략한다. 원자력 발전소의 2차계는 화력 발전소와 같다고 볼 수 있기 때문에 2차대전 전후에 완성된 각종 제어기 설계 및 분석기법이 응용될 수 있었으나, 1차계는 원자력 발전소 만이 갖는 동특성외에 2차계의 영향도 고려해야 하므로 종래의 2차계 특성해석 만으로는 곤란하다. 이러한 문제를 감안하여 1961년 Schultz는 원자력 발전소의 제어문제를 반응도 레환제어,

온도 레환제어 등을 고려하여 연구하였다. 즉 전플랜트(Total plant)에 대해서 전달함수와 주파수 응답법으로 온도 레환, 반응도 레환시의 레환루프를 분석하였고 또한 과도응답도 검토하였다[43].

그후, 원전이 전력공급원으로서의 비중이 높아지고 용량 증대에 따른 사고감소 경제성 제고, 신뢰성 확보의 중요성이 증가하여 현대제어 이론을 응용 하고자 하는 연구가 다방면에 걸쳐 이루어져 오늘날에 이르고 있다.

표 1. 원자력 발전소에서의 최적화 문제

구분	항목	최적화 수법
제어	출력제어	최대원리(MP) 동적계획법(BP)
	Xe독작용 최소화제어	최대원리 동적계획법
	분포계 최단시간제어	최대원리 동적계획법
계측	미입계도 추정	Kalman Filter
	중성자속 분초추정	Kalman Filter
	방사선 감시계 최적화	DP법
설계	최적차폐	MP, DP
	최적노심	경사법 (Gradient Method)
	플랜트 최적화	DP
노내분포	출력 평탄화	LP(Linear Programming) MP, DP
연료계획	최적연소	MP, DP
	최적 연료교환	DP
	연료투입 계획 최적화	LP

### 3. 원자력 발전소의 최적제어

#### 3.1 최적제어 연구현황[16-19,41-65]

원자로 제어계의 집중정수 동특성을

$$x(t) = f(x(t), u(t), t) \quad (1)$$

와 같이 간단히 나타낼때 중성자속, 압력, 온도등은 상태변수  $x(t)$ 로 반응도, Xe독작용 등은 조작량  $u(t)$ 로 취급하는 것이 보통이다. 원자로 제어계에서의 최적제어는 최단시간제어, 최적가동시간, 최적부하 추중성, 최적반응도, Xe독작용 최적제어 등이 많이 연구되고 있고 특히 이들 외에 최적화 문제는 여러 분야에 걸쳐 많이 연구되어 있다(표 1 참조).

이의 수학적 해는 동적계획법(DP법), 최대원리(MP법), 구배법 등이 있으나 원자력발전소에는 DP법 및 MP법을 이용한 것이 주로이다.

##### 3.1.1 최단시간 제어(Reactor Startup)

시간과 더불어 제어변수가 변할때 초기 또는 어느 시각의 상태에서 목적지까지 최단시간에 상태가 가장 좋은 점으로 이동할 수 있도록 제어하는 출력의 최단시간 제어는 기동시간의 단축, 출력 변경시의 부하속응성 때문에 원자로 제어에 많이 연구되고 있다.

특히 우주용, 선박용 원자로에는 동특성의 급격한 변화에 응해야 하므로 대단히 중요한 인자로 지적되고 있다. 시간 제어에 있어서 최종시간 제어 최단시간 제어 등이 있으나

원자력 발전소 제어에서는 목적상 최단시간 제어와는 연구된 것이 드물다.

최단시간 제어도 종단시간이 지정된 경우와 지정되지 않는 경우가 있으나 안전성등이 고려되어야 하므로 어느 정도의 제한 조건이 있게된다. 이 제한조건은 상태변수에 의한 제한과 제어변수에 의한 제한으로 원자로의 경우는 노심의 출력 밀도(상태변수 제한), 제어봉속도(제어변수 제한) 등을 어느 일정치 이상으로 할 수 없는 것이 이에 해당된다.

##### 3.1.2 제논(Xe)의 독작용 최적제어

원자로의 최적제어에 가장 중요한 것의 하나가 제논의 독작용에 관한 제어이다. 제논은 핵분열 결과에 의해 발생되는 Xe이 열중성자를 상당히 강하게 흡수하여 현저하게 반응도가 저하하는 현상으로, Hanford 프루토늄 생산 원자로에서 발견되어 Fermi에 의해 그 기구가 해명되었다.

특히 장시간에 걸쳐 원자로를 운전한 후 정지할 경우 135Xe가 일시적으로 현저히 증가하여 재기동이 불가능하게 되는데 이것을 피하기 위해서는 적당한 계획을 가지고 노정지를 행한 후 제논의 독작용이 감소하도록 제어하게 된다. 이에 는 다음과 같은 문제를 다루게 된다.

###### ① 최대치 최소화(Xenon Shutdown)

이것은 가장 먼저 연구대상이 된 것으로 정해진 시간  $T_c$  내에서 노정지후 Xe농도의 최대치  $X_m$ 이 최소가 되도록 제어한다. 일반적으로 중성자속은 제어변수 Xenon과 Iodine 농도는 상태변수가 되고 주로 최대원리에 의해 연구된 것이 많다.

###### ② 제논의 최소화

노정지 후 어느 지정된 시각  $t_g$ 에 있어서 제논값  $X(t_g)$ 를 최소로하는 것인데  $X(t_g) < X_r$  이면 예정시각  $t_g$ 에서 재기동이 가능하다.

###### ③ 개시(잠복)시간 최대화

주어진 시간  $T_c$ 내에 어떻게 해서든 재기동 불가능 상태를 면하지 못하는 경우 재기동까지의 시간을 최소로하는 문제로서 이것의 최적화에 의한 이득은 적기 때문에 이에 대한 연구는 흔치 않다.

###### ④ 종료(회복)시간 최소화

계획적인 보수작업을 완료하고 재기동 할 경우 재기동 불능시간을 최소화하는 문제를 다룬다.

###### ⑤ 제논진동 최소화 문제 (Xenon Oscillation)

어떤 원인 또는 외란에 의해 국부적으로 중성자속이 증가하여 135Xe를 발생시킬 수 있는 원자의 감소와 135Xe의 생산이 감소하게 된다. 즉 Xe이 감소하면 반응도가 증가하여 국부적으로 출력의 감소 또는 증가현상이 일어나는데 (Xenon Oscillation) 이 진동을 최소화하기 위해 최적제어 이론을 도입한다.

1957년 Henry Germann[42]은 제논의 진동효과를 포함한 리액터 안정도 문제를 처음으로 검토하였고 그후 많은 사람들이 동적계 획법 또는 최대원리를 이용하여 제논의 진동효과를 최소화하는 문제를 연구하였다[51-56].

### 3.1.3 로내 중성자속 분포의 최적화

제어재, 연료등의 분포를 조정하여 중성자속 분포를 최적화하여 임계질량의 최소화, 제어재의 최적 유효분포, 출력의 평탄화, 연료전환율의 최대화등을 실현하는 것으로 본란에서는 제외한다.

### 3.1.4 플랜트의 최적제어

지금까지 기술한 노심내의 물리적인 특성의 최적화 외에 터어빈 발전기까지 포함된 시스템을 한 시스템으로 하여 부하변화에 따른 각 subsystem의 최적화 방법 및 특성을 연구한 것이다.

## 3.2 각국의 최적제어 연구현황

### 3.2.1 미국[41-65]

미국은 원전 개발국으로서 1950년대 후반기부터 현대제어 이론을 이용 하고자 하는 연구를 왕성히 하여 shutdown 시 일어나는 제논의 최대 농도 최소화 문제[50,51], 대형 리액터에서 운전중 부하변화에 따른 제논의 과도상태[51], 제논의 진동문제[53-56], 중성자속의 최적제어[57- 58], 2개 이상의 원자로 로심을 가진 리액터에서 노심상호간의 간섭을 받지않고 최적제어 할 수 있는 방법[76] 등을 최적제어 기법을 이용해 제시하였다.

PWR전체 시스템에 제어에 대한 연구로는 E.DUMCOMBE 와 D.E.RATHBONE의 상태 변수 최적제어를 이용한 부하 변동시 제어부의 최소 구동방법, 측정불가능한 상태변수 추정에 의한 시스템의 최적상태 제한제어[45]가 있으나 실시 각 제어능력에 대한 문제는 결론을 얻지못했다.

또 B.FROGNER & L.M.GROSSMAN[71]는 1100MWE BWR의 선형모델을 이용해 최적상태 제한제어, 정상운전중 65 - 100% 사이에서의 부하추종성, GAUSSIAN STOCHASTIC NOISE APPUMPTION과 파라메터 추정이론, 칼만필터를 이용한 센서의 잡음과 측정불가능한 상태의 추정, 다변수 제어이론, 디지털 제어 기법등 모든 현대제어 이론의 기법을 종합적으로 취급하였다.

### 3.2.2 일본

일본에서의 원전에 대한 최적제어 연구는 1960년대부터 시작되어 반응도의 최적시간 제어[17], 종래의 PID제어에 최적조정기 이론을 이용한 운전자의 최적조정 및 모델과 실모델과의 격차문제[19]등을 다룬게 있다.

이외에 최적제어를 취급한 분야로는 중성자속 제어[17,18], 다변수계의 최적 비간섭 문제[28-30]등이 있으나 그리 많지 않은 편이다.

### 3.2.3 기타

기타 원전관련 국가로서 제어분야를 활발히 연구하고 있는 국가는 인도,캐나다, 노르웨이등을 들수 있는데 이들 국가는 노심자체의 동특성 연구보다는 플랜트 전체의 관점에서

연구된 것이 많다. 즉 인도의 GIRIJA SHANKAR,G [96, 97] 등은 BWR 의 다변수모델에서 노심의 입구온도 변화와 주 증기변의 개도변화에 의한 외란에 대해 시스템이 안정하게 운전될수 있는 입구온도, 주증기변의 개도등을 최적제어 이론을 이용해 제시한것 외에 M.GOPAL[97]의 다변수 시스템에 대한 최적제어 문제 검토, P.PRATAPACHANDRAN NAIR[107]이 H.B.ROBISON PWR 모델의 다변수 시스템에서 최적제어 이론을 적용한 것등은 모두 전플랜트(Total plant)의 관점에서 연구된 것들이다.

또, 캔두형 원자로의 부하추종시 중성자속의 최적제어 문제[85], 노르웨이 JORNA KARPPINEN과 미국 ROB M. VERSLUIS, BJORN BLOMSNES 의 대형PWR에 있어서의 출력분포 즉, 부하변화시 원자로의 부하분포(axial & azimuthal) 상태와 이때의 제논진동, 아이오다인(135I) 효과등에 대한 제어문제, 벨기에의 J.GODET[72]가 연구한 PWR 원자력 발전소 1차 냉각재 평균도의 최적제어시 이산시 스템에서의 샘플링 주기에 의한 감도 및 제어변수의 영향등을 다룬게 있다.

### 3.2.4 국내의 연구현황

1985년 과학원에서 PWR 의 증기발생기의 6차 모델에 대한 PID최적제어기 설계기법을 제시했다.

## 4. 원자력발전소에 대한 적응제어의 연구

### 4.1 개요

비행체의 동특성, 탄도등과 같이 시스템의 동특성이 시간 변화에 따라 급격히 변하는 시스템의 제한회로 설계 및 보상에 대한 결점을 보완할 수 있는 적응제어(Adaptive Control) 개념이 1955년 제안된 이래 원자력 발전소에서는 단일용량의 증대,부하분담율의 증가에 따라 부하추종성, 전력계통 외란에 대한 적응성등을 연구하기 위해 이들 기법이 많이 연구되어 오고 있다.

### 4.2. 각국의 연구현황

#### 4.2.1 미국

원자력 발전소에 적응제어 이론을 처음으로 도입한 것은 1958년 Corbin과 Miskim[88]이 아나로그 컴퓨터를 이용하여 리액터와 제어기 상수를 일정히 유지하도록 한 것 부터이다. 그후 리액터의 최소시간 응답을 얻기 위해 적응제어 기법을 응용[47-49]한것 외에 적응제어 기법을 이용한 것에는 주로 3.1절에서 언급한 것중 부하변화시 노심의 동특성 적응성등을 연구한 것이 주로이다[87-92].

#### 4.2.2 캐나다

1971년 캐나다의 G.T.Bereznai 와 N.K.Sinha[91] 는 미국의 I.Klinger가 이용한 아나로그 컴퓨터 대신 디지털 컴

퓨터를 최초로 이용해 적응제어에 필요한 각종 파라메타를 계산하여 전 부하시의 20~200[%] 사이에서 부하 적응성을 연구하였다. 이어 G.T.Bereznai는 1972년 CANDU의 최적 저차 선형모델을 이용해 실용 가능한 점에 중점을 두고 적응제어 기법을 도입, 연구하였다. 이외에 적응제어 기법을 이용한 것에는 위에서 언급한 분야가 주로 이다[104].

#### 4.2.3 일본

S.Suzuki와 K.Fukunishi[25]가 원자력발전소 제어시스템의 파라메터를 최적조절 할 수 있는 방법을 적응제어(Auto-tuning)기법을 이용해 수행한 것이 있다. 이 연구에서는 BWR의 3개의 주요루프 즉, 급수계, 압력계, 1차 루프계의 동특성이 가장 최적으로 제어되도록 제어시스템의 파라메타를 조절하는데 Auto tuning 기법을 이용하였다.

#### 4.2.4 국내의 연구

1986년 참고문헌[108]에서는 온-라인 제장시설 고장검출 방법을 적응제어 기법에 기초를 두고 칼만이득을 얻을 수 있는 방법을 발표했으나 이것은 순수한 제어라기 보다는 고장진단 분야로 보는 것이 좋을 것 같다. 또, 참고문헌 [109-110]는 원자력 발전소 부하추종성 능력을 제고시키기 위해 필요한 PWR 적응제어용 모델을 제시하였다.

### 5. 원자력 발전소에 대한 다변수제어 연구

#### 5.1 개요

일반적으로 원자력 발전소와 같은 대규모 화학 플랜트에서는 조정해야 할 입력과 제어되어야 할 출력이 대단히 많은 다변수 시스템인 경우가 대부분이다.

이러한 다변수 시스템의 제어기설계, 분석, 안정도판별 등은 종래에는 단일 입, 출력 시스템으로 취급하여 독립적으로 설계하므로 컴퍼넌트(또는 Subsystem) 특성과 그 상호간의 영향이 무시되어 안정성, 신뢰성, 특히 경제성 면에서 불합리한 점이 많았다.

다변수 시스템에 대한 연구는 1950년대 디지털 컴퓨터의 출현과 항공기, 인공위성의 안내제어를 위한 제어의 중요성이 인식되면서 비행중 동특성을 고려한 비행기 엔진제어, 인공위성 안내제어등에 1960년대 Kalman이 현대제어 이론을 도입함으로써 더욱 급속한 발전을 하였다. 또한 Bellman과 Pontryagin의 최적제어 해를 위한 방법의 제시는 다변수 시스템의 연구에 더욱 보탬이 되었고, 이어 1967년 W.M.Wonham이 상태궤환에 의한 다변수 제어기의 가제어와 극배치문제, Rosenbrock의 원하는 극만을 가지고 시스템을 간단히 할 수 있는 모달제어 기법 및 주파수 영역에서의 설계기법에 의한 다변수 시스템의 설계용 CAD(1974) 개발과 1973년 MacFalane의 시간영역에서의 CAD 개발로 설계, 분석, 응용이 이루어지면서 원자력 발전소에

대한 응용이 가속화되었다.

#### 5.2 각국의 연구현황

##### 5.2.1 미국

원자력 발전소의 제어에 다변수제어 기법을 처음으로 연구한 것은 1970년 미국의 G.V.S.Raju[76]가 Coupled core Reactor의 제어기 설계에 Core간의 간섭을 줄일 수 있는 방법을 제시한 것이다. 이 연구에서는 3개의 Core 각각의 제어봉 위치를 입력으로 하고 출력은 Reactor Power로 하여 Core 상호간의 간섭을 배제시킬 수 있는 방법을 제안했으나, Decoupling의 최적화 문제는 검토되지 않았다. 이어 G.V.S.Raju와 U.G.Fadra[83]는 위 연구에서 거론되지 않은 비간섭(Noninteracting)의 최적화 문제를 검토하였고, 부하변화시 각 변수를 최적으로 조정가능한 방법을 다변수 제어기 설계기법에 기초를 두고 제시한 것[71](최적제어란 참조) 외에 다변수 기법은 그 응용상 시스템 상호간의 비간섭 문제를 다룬게 주로이다[75,83].

##### 5.2.2 일본

1978년 K.Matsubara 등[27]은 BWR에 대해 입력으로 바이패스변의 위치, 강제 순환펌프 제어기의 설정점을 이용하고 출력으로는 주중기 유속, 1차 순환회로의 유속을 설정하여 자동복귀 가능한 다변수제어 시스템을 연구하였으나 운전중 제어문제는 검토되지 않았다.

이외 다변수기법에 의한 리액터의 운전중 잡음제거 기법[28], 대형 리액터를 가진 PWR 발전소 제어계통에서 부하변동에 따라 Core 상호간에 간섭(Coupling)을 받지 않고 decoupling 제어될수 있는 방법을 INA기법[29]을 이용해 제시한것 등이있다.

##### 5.2.3 기타

인도의 P.V.Girija[96,97]등이 연구한 다변수 시스템 대한 응답, 캐나다 H.G.Kwatny[86]의 발전기 병렬 운전 중 1개의 발전소 Shutdown시 다른 발전소 제어를 단일변수 제어 개념을 탈피하여 속도, 발전량, 1차계 압력 등을 고려한 다변수 제어개념을 도입함으로써 약 75[%]까지 부하부담을 증가시킬 수 있음을 제시한 것 등이 있다.

#### 5.3 국내의 연구현황

원자력발전소 제어문제를 다변수제어 이론을 도입하여 연구한 것은 참고문헌 [112]에서 CANDU모델과 주파수 영역에서의 INA기법을 이용해 설계, 분석한 것이 있다.

### 6. 기타 연구현황

위에서 언급한 원자력발전소의 직접적인 제어외에 리액터 및

발전기의 안정도 문제[15,31,98,99], 부하 및 전력계통 외란시의 과도응답[16], 시스템의 상태와 측정 불가능한 변수들의 추정 [28-38,74]또는 이를 이용한 계장시설의 고장진단[32-38], 원자력 발전소의 부하추종성[73]등도 대부분 현대제어 이론을 도입하여 신뢰성 및 능률향상을 꾀하고자 하는 연구가 급증하고 있다.

## 7. 검토

### 7.1 원자력발전소 제어이론에 대한 검토

제어이론은 1750년대까지의 원시적인 단계를 거쳐 1910 ~ 1940년 대의 산업혁명에 의한 실용화 단계, 1940 ~ 1960년대 고전적인 방법에 의한 제어이론 해석 및 응용의 시대, 1960 ~ 현재까지 현대 제어이론의 시대로 구분 할 수 있다.

특히 1970년대부터 제어시스템의 해석,설계를 위한 CAD 시스템의 개발로 이의 응용이 급격히 늘어난 것으로 나타나고 있다. 또한 1950년 중반부터 1960년대 말까지 동적계획법, 최대원리를 이용한 최적제어 문제가 연구의 절정을 이루었으나 복잡한 시스템에서는 최적제어 문제외에 다양성 및 적응성이 요구되어 1950년대 후반부터는 적응제어 및 다변수제어에 대한 연구가 점차 늘어가고 있다. 특히 최근에는 이들 제어이론의 연구 및 응용은 어느 한 분야만을 알고 이룩할 수 없을 정도로 혼합구성 하여 연구, 응용하고 있는 추세이다. 원자력 발전소에서의 제어이론 및 연구추이도 이와같은 발전과정을 거치고 있고 특히 최적화 문제는 표 1에서와 같이 다방면에 걸쳐 많이 연구되었는데 최근 기저 부하용으로의 한계성, 외란에 대한 적응성등이 요구되어 적응제어 및 다변수제어 기법을 이용해 이들을 해결하기 위한 연구가 증가되어 가고 있는 추세에 있다.

### 7.2 각국의 연구현황에 대한 검토

#### 7.2.1 미국

미국은 이미 서론에서 언급한 바와 같이 1940년대 CP-1 과 CP-2에서 원자력발전소에 필요한 동특성, 주파수응답, 전달함수등을 실질적으로 구하였고, Hanford 원자로에서는 제논의 독작용을 발견, 그 기구를 완성한 바 있다. 그 후 이들의 최적화 문제를 다방면에 걸쳐 연구하여 1960년대 제논의 최대농도 최적화 문제, 이들에 대한 온도회환 효과, 과도상태, 전플랜트에 대한 종합적인 제어시스템등을 연구하였다. 이어 1970년대 초에는 현대제어 이론을 이용한 원자력발전소 파라메타의 상태추정, 센서의 잡음제어, 다변수제어, 디지털제어 기법등 다방면에 걸쳐 연구하였으나 TMI사고 이후 원자력발전소의 신축이 급격히 감소하여 이들에 대한 연구는 다소 둔화된 상태이다. 그러나 이미 이룩한 광범위한 기초연구를 바탕으로 새로운 방향으로의 연구[77-82]가 진행 중이다.

#### 7.2.2 일본

1957년 JRR-1 연구용 원자로가 가동되면서 제어계의 해

석, 최적조정 등에 대한 기반기술을 확보하여 1966년 BWR 이 처음 상업운전에 들어갈때 많은 기여를 한것으로 평가되고 있다. 일본은 미국 GE 사의 BWR 발전소 도입시 현지 훈련과정에서 운전, 조작등 훈련 외에 이들을 뒷받침할 수 있는 각종 제어관련 이론 및 기반기술을 습득하여 많은 성과를 거두어 1960년대에 이미 각종 현대제어이론 기법을 이용한 연구결과를 발표했다[7,42]. 1970년대에는 JPDR에서 다변수기법을 도입하여 자기복귀능력을 가진 시스템개발을 발표한바 있고[27], 이어 상용 원자력 발전소의 감시, 파라메타 추정을 다변수기법으로 연구했다. 이러한 기반기술에 힘입어 최근에는 각종 첨단기술을 이용한 지능제어 시스템을 히다찌, 도시바, 미쓰비시등 원자력 관련기업 [11-13]에서 활발히 연구 또는 제품화하고 있고, 1981년부터는 부하추종성 향상, 가동을 향상, 피복저감 등을 대상으로한 ABWR 및 APWR 연구를 3년간 통산성 주관하에 시행한 바 있다[9-12].

#### 7.2.3 기타

##### 7.2.3.1 캐나다

1947년 NRX 가동에서 얻은 주파수 응답특성, 동특성등을 기초로 1950년 상용 발전소가 가동됨에 따라 고전적 이론에 의한 제어기법을 적용한 것이 많다. 가장 먼저 컴퓨터 제어를 이룩한 CANDU형은 1950년 후반부터 NRX에서 얻은 컴퓨터 제어 실험을 기초로 1960년대 초부터 현대제어이론을 도입한 상태추정외에 디지털 제어문제에 대한 연구가 많다.

또한 1970년대에는 분산형 컴퓨터 제어, 기타 이에 관련된 제어이론 및 연구가 많고 1980년대 초에는 신뢰성 향상을 위한 컴퓨터 제어시스템 및 다변수 제어 이론을 이용한 발전소의 제어시스템에 대해 이론, 응용, 시뮬레이션, 설계용 CAD 개발등 종합적인 연구[93]를 완성하였고, 이어 실용화 문제를 연구 [77,94] 중에 있다.

##### 7.2.3.2 노르웨이

1970년 현대제어 이론을 바탕으로 한 온-라인 디지털 컴퓨터 제어시스템을 BWR에 도입하기 위한 계획을 수립하여 시행한 바있다[99]. 이 연구에서 T.J.Bjolo 등이 얻은 결과는 원자력 발전소의 현대제어 이론연구, 다변수 및 디지털 제어 연구에 많이 인용될 만큼 많은 업적을 얻은 것으로 평가[77])되고 있다.

#### 7.2.4 국내

국내에서는 원자력발전소 제어를 위한 기초자료 조사, 연구, 실험등이 미흡한 상황에서 원자력발전소가 도입됨으로써 현대 제어 이론을 이용한 연구는 그리 많지 않으나 전력공급원으로서 중요한 위치를 차지함에 따라 이를 응용하기 위한 연구가 증가하는 추세이다.

또한 원전의 신뢰성 및 경제성 제고를 위해서는 시스템에 대한 Modeling 및 동정등과 같은 기초적인 문제부터 제어계 설계, 분석등에 이르기까지 다방면에 대한 연구가 절실히 요망된다.

## 8. 연구전망

위의 현황 및 분석은 원자력발전소의 제어이론 중에서 주로 발전소의 전체 시스템 제어에 현대제어 이론을 응용하고자 하는 것만을 발췌, 검토하였다.

최근의 제어시스템의 연구추이를 목적에 대한 추종성, 지적 능력(AI 또는 EXPERT)부여에 목적이 있다고 보면 이를 위해서는 고장에 대한 자기진단기능(Selfdiagnosis), 환경에 대한 다양성(Multivariable), 적응성(Adaptive), 경제성을 위한 시스템의 최적화(Optimal)등이 검토되어야 하므로 현대제어 이론을 이용한 응용문제는 더욱 다각적으로 연구될 것으로 전망된다[1-16, 77-82, 99-101, 113]. 또한 마이크로칩의 용량, 가격등이 해결되고 신뢰성, 경제성이 더욱 요구되면 이의 실용화 문제도 더욱 적극적으로 검토될 것으로 본다.

## 9. 결 론

지금까지 살펴본 바와 같이 시스템의 해석, 설계, 진단, 상태추정등과 같이 다방면에 걸친 분야에 현대제어이론을 응용하고자하는 연구가 급격히 늘고 있다. 이러한 연구추세를 확립하기 위해서는

1) 현대제어 이론에 대한 다방면에 걸친 기초이론이 연구되어야 한다.

즉 이미 언급한 한 부분만을 가지고는 현재 제어이론의 발전추세에 대응 할 수 없기 때문에 적응제어, 다변수제어, 최적제어, 디지털제어등과 같은 분야의 기반연구가 확고히 이룩되어야 하고

2) 이들 시스템 이론을 목적하는 시스템, 즉 원자력발전소 전체시스템 또는 원자로, M/G Set, 가압기, 증기발생기등과 같은 시스템에 응용하기 위해서는 이들 시스템에 대한 동특성, 시스템 인식등 대한 기초 연구가 충분히 연구되어야 한다.

3) 이를 구현 또는 연구할 수 있는 전산프로그램의 개발 또는 기존 전산프로그램의 재정비가 필요하다. 즉 계산, 평가, 응용등의 제어시스템용 CAD에 대한 정비, 개발이 병행되어야 한다.

4) 위 1) 2) 3)의 결과에 의해 향후 실용적인 문제에 대한 연구를 위해 서는 컴퓨터의 하드웨어 시스템에 대한 검토도 필요하다.

위와같은 연구결과에 의해서만 향후 추구하고자하는 인공지능, 전문가 시스템등의 효과를 거둘 수 있다고 판단된다. 실제 컴퓨터제어 및 운용체계를 가장 먼저 이룩한 캐나다의 경우 제어를 위한 동특성 해석, 시뮬레이션등의 결과를 거친 후 실험실에서 이를 하드웨어로 구현하여 실험을 통해 실용화 했고 이어 현대제어 이론을 적용하기 위한 설계 분석용 종합 CAD 개발을 완료하고 이의 실용화 연구를

진행하고 있음을 이미 언급한 바 있다. 따라서 제어이론, 동특성해석, 컴퓨터 하드웨어, 소프트웨어 등 제어를 위한 전반적인것이 체계적으로 확립되어 있지않는 실정에서는 이들에 대한 관련연구 및 투자가 절실히 요망 된다.

## 참 고 문 헌

- [ 1 ] "가압경수형 원자력발전 플랜트의 변천 및 개발현황," 미쓰비시 중공업보 Vol.19, No.6, PP.620-641, 1982
- [ 2 ] "원자력발전소의 운전방법," 원자력공업 Vol.14, No.3, PP.61-64, 1963
- [ 3 ] "원자로 계장의 현상과 장래," 일본 원자력학회지, Vol. 14, No.7, PP.44- 68, 1972
- [ 4 ] 원자력공업, Vol.29 , No.6 , PP.73- 84, 1978
- [ 5 ] "화력 원자력발전소에 있어서의 최근의 제어기술," 화력원자력공업, Vol.39, No.3, PP.45- 55, 1988
- [ 6 ] "원자로 계장제어의 진보(I)," 일본 원자력학회지, Vol. 9, No.5, PP.31- 41, 1967
- [ 7 ] "1100Mwe 원자력발전소의 설계 경험과 신기술," 화력 원자력발전, Vol.32, No.4, PP.1 - 7, 1981
- [ 8 ] "" 본에 있어서의 나트륨 냉각용 계장기기의 현상과 장래," 일본 원자력학회지, Vol.22, No.9, PP.8-19, 1980.
- [ 9 ] "최근의 PWR용 원자력발전소의 계측제어 설비 동향," 화력원자력발전, Vol.38, No.3, PP.63-72, 1987.
- [ 10 ] "원자로 계장의 동향과 문제점," 일본 원자력학회지, Vol.17, No.6, PP.7-15, 1975.
- [ 11 ] "최근의 가압경수형 원전의 특징," 미쓰비시중공업보, Vol.19, No.6, PP.24- 33, 1982.
- [ 12 ] "원전 운전의 현상과 지식공학," 원자력공업, Vol.32, No.11, PP.13-31, 1986.
- [ 13 ] T.FUKUZAKI et el, "Knowledge based system for control rod programming of BWRs," J.Nuc Sci & Tec Vol.25, No.2, PP.120- 130, 1988.
- [ 14 ] "제어실무에서 본 제어이론," 계측과제어, Vol.24, No.3, PP.69-72, 1985.
- [ 15 ] "전력계통 고장시 원전운동," 일본전기학회지, Vol.101, No.4, PP.25-30, 1981.
- [ 16 ] "원전의 부하추종운전," 일본원자력학회지, Vol.28, No.10, PP.29-39, 1986.
- [ 17 ] Kazuo Monta, "Time optimal digital computer control of Nuclear reactors," J.Nuc Sci & Tec, Vol.3, No.6, PP.227-236, 1966.
- [ 18 ] K.Asatani, "Suboptimal control of Nuclear Reactor with distributed parameters using singular perturbation theory," Nuc Sci & Eng, Vol.62, No.9, PP.9-19, 1977.
- [ 19 ] S.Mankin, "Application of linear optimal control technique to control of a Nuclear Reactor Plant," J.Nuc Sci & Tec, Vol.12, No.12, PP.727-731, 1975.

- [20] "유화학 플랜트에 있어서의 모델예측제어 패키지," 제장, Vol.31, No.2, PP.15-19, 1988.
- [21] 일본전기학회지, Vol.106, No.11, PP.1-89, 1986.
- [22] 일본전기학회지, Vol.100, No.4, PP.1-41, 1980.
- [23] 日立平論, Vol.70, No.4, PP.1-89, 1988.
- [24] 日立平論, Vol.68, No.4, PP.1-41, 1986.
- [25] S.Suzuki, "An autotuning method for control system parameters in nuclear power plants," Nuc.Tech, Vol.58, PP.379-387, 1982.
- [26] K.Fukunish, "Noise source estimation of BWR power fluctuation by autogression," Nuc Sci & Tech, Vol.67, PP.296-308, 1978.
- [27] K.Matsubara, "A multivariable autogressive model of the dynamics of a BWR," Nuc Sci & Eng, Vol.65, P.1-16, 1978.
- [28] B.R.Upadhyaya, "Multivariable signal analysis algorithms for process monitoring and parameter estimation in nuclear reactors," Ann.Nuc Engery, Vol.7, PP.1-11, 1979.
- [29] M.Tsuji, "Approximate noninteractive power regulation of a coupled-core nuclear reactor," IEEE NS-20, P1835-1842, 1983.
- [30] "다변수 제어론을 이용한 발전기의 최적제어 시스템," 제장, Vol.27, P54-57, 1984.
- [31] "원자력 발전소 1 호기 과도응답 시험과 해석," 일본원력 학회지, Vol.15, No.3, PP.184-190, 1972.
- [32] 자로 고장진단기술, 일본원자력 학회지, VO.15, PP.16-22, 1973.
- [33] 원자로 이상진단장치 개발, 일립평론, Vol.55, PP.839-843, 1973.
- [34] 플랜트 감시 진단기술, Toshiba review, PP.951-954, 1982.
- [35] 플랜트 이상감시장치 개발, 일본원자력 학회지, Vol.24, No.3, PP.7-226, 1982.
- [36] BWR의 잠음해석법에 의한 노심, 제어계 진단 시스템, Toshiba Review, PP.983-987, 1981
- [37] 화학플랜트용 이상진단 시스템에 있어서 표시법 개선, 화학공학 논문집, Vol.10, No.4, PP.531-533, 1984.
- [38] 이상검출 기술과 고장진단 시스템, 기계의 연구, Vol.32, No.3, P1-7, 1980.
- [39] 모델규범 적용제어계, 계측과 제어, Vol.17, No.8, PP.602-612, 1978.
- [40] H.Hashimoto, "Development of Advanced Boiling water Reactor plant," Toshiba review, Vol.37, No.11, PP.945-950, 1982.
- [41] "다변수 이론에 기초를 둔 발포 폴리에 치렌 전선의 CD 제어," 계측과 제어, Vol.23, No.2, PP.44-50, 1984.
- [42] "원자로의 동특성과 제어," 동문서원, 1968.
- [43] M.A.Shultz, "Comparative Reliability Analysis of Reactor safety systems," Nuclear Safety, Vol.14, No.6, PP.605-617, 1973.
- [44] N.Kallay, "Dynamic programming and Nuclear reactor systems design," Nuc Sci & Eng, Vol.8, PP.315-325, 1960.
- [45] W.C.Lipinski, "Optimal digital computer control of Nuclear Reactors," IEEE NS-17, No.1, PP.510-516, 1970.
- [46] D.C.Wade, "Optimal control of nuclear reactor depletion," Nuc Sci & Eng, Vol.45, PP.199-217, 1971.
- [47] ANL-7664
- [48] ANL-7530
- [49] ANL-7668
- [50] M.Ash, "Application of Dynamic programming to optimal control shutdown control," Nuc Sci & Eng, Vol.24, PP.77-86, 1966.
- [51] J.J.Roberts, "Experimental Application of the time optimal Xenon shutdown program," Nuc Sci & Eng, Vol.27, PP.573-580, 1967.
- [52] W.M.Stacey, "Optimal control of Xenon power spatial transients," Nuc Sci & Eng, Vol.33, PP.162-168, 1968.
- [53] A.M.Christie, "On the control of spatial Xenon oscillations," Nuc Sci & Eng Vol. 51, PP.10-24, 1973.
- [54] A.A.Eibasson, "Minimal time control of spatial Xenon oscillations in nuclear power reactors," Nuc Sci & Eng, Vol.54, PP.166-176, 1974.
- [55] D.C.Bauer, "Practical Xenon spatial control," Nuc Tec, Vol.21, PP.165-189, 1974.
- [56] W.M.Stacey, "Control of Xenon spatial oscillation," Nuc Sci & Eng, Vol.38, PP.229-243, 1969.
- [57] A.G.Meir, "Substitution of the soluble boron reactivity control system of a PWR by Gadolinium burnable poisons," Nuc Tech, Vol.75, PP.127-133, 1986.
- [58] H.S.Cheng, "A space time analysis of void reactivity feedback in boiling water reactor," Nuc Tech, Vol.41, PP.283-298, 1978.
- [59] C.G.Love, "A nonlinear dynamic optimization technique for controlling Xenon oscillations in large nuclear reactors," IEEE 18, PP.408-411, 1971.
- [60] N.Tsour, "Optimal control a large core reactor," IEEE NS-22, PP.702-710, 1975.
- [61] K.Asatani, "Suboptimal control of Nuclear reactors with distributed parameters using singular perturbation theory," Nuc Sci & Eng, Vol.62, PP.9-19, 1977.
- [62] L.Tepper, "Suboptimal control, study of a nuclear power plant," IEEE NS-22, PP.812-819, 1975.
- [63] J.P.Macdonald, "Design & Analysis of boiler turbine-generator using optimal linear regulator theory,"



- IEEE AC-18, No.3, PP.202-209, 1973.
- [ 64 ] S.Mankin, "Application of linear optimal regulator technique to control of a nuclear reactor plant," *J. Nuc Sci & Tec.* Vol.12, No.12, PP.727-734, 1975.
- [ 65 ] J.Karppinen, "Spatial reactor control methods," *Nuc Sci & Tech*, Vol.64, PP.657-672, 1977.
- [ 66 ] J.L.Macdonald, "Application of artificial intelligence techniques to digital computer control of nuclear reactors," *Nuc Sci & Tec*, Vol.56, PP.142-151, 1975.
- [ 67 ] K.J, "Expert control," *Automatica*, Vol.22, No.3, PP.277-287, 1986
- [ 68 ] J.Fessl, "An application of multivariable self tuning regulators to drum boiler control," *Automatica*, Vol.22, No.5, PP.581-585, 1986.
- [ 69 ] R.Cori & C.Maffezzoni, "Practical optimal control of a drum boiler power plant," *Automatica*, Vol.20, No.2, PP.163-173, 1984.
- [ 70 ] E.W.Hagen, "IAEA International symposiums on nuclear power plant and instrumentation."
- [ 71 ] B.Frogner, "Control of nuclear power plants," *IEEE AC-23*, No.3, PP.405-417, 1975.
- [ 72 ] J.Godet, "Optimal control of primary coolant temperature in a nuclear plant," *Automatica*, Vol.18, No.4, PP.373-383, 1982.
- [ 73 ] J. L Tylee, "On-line failure detection in Nuclear power plant instrumentation," *IEEE AC-28*, No.3 PP.406-415, 1983.
- [ 74 ] L.F.Miller, "Nuclear reactor control system design with sensor failure," *Nuc Tech*, Vol.36, PP.93-105, 1977.
- [ 75 ] K.S.yeung, "Design of multivariable feedback systems using progress decoupling," *IEEE Vol.IE-32*, No.1, PP.32-36, 1985.
- [ 76 ] G.V.S. Raju, "Noninteracting control system design for a coupled core nuclear reactor," *IEEE NS-17*, No.1, PP.541-548, 1970.
- [ 77 ] A. Krigman, "Are advanced control strategies coming of age?," *Intech* PP.260-272, 1985.
- [ 78 ] J.A.Bernard, "The nuclear industry and digital control," *Intech*, PP.61-65, 1985.
- [ 79 ] A. Krigman, "Nuclear power plant instrumentation," *Intech*, PP.27-49, 1985.
- [ 80 ] R.Aoki, "Features of current PWR power plant," *Mitsubishi heavy industries technical review*, PP.93-104, 1983.
- [ 81 ] W.C.Lipinski, "Simulation of the treat-upgrade automatic reactor control system," *IEEE NS-32*, No.1, PP.1007-1011, 1985.
- [ 82 ] K.J.Astron, "Process control past, present, and future," *IEEE control systems*, Vol.5, No.3, PP.3-10, 1985.
- [ 83 ] G.V.S.Raju, "Design of an optimal noninteracting control system for a coupled core nuclear reactor," *IEEE NS-20* No.1, PP.668-674, 1973.
- [ 84 ] B.Frogner, "Estimation and optimal feedback control theory applied to a BWR," *Nuc Sci & Tech*, Vol.58, PP.265-277, 1975.
- [ 85 ] R.B.Newell, "Experimental evaluation of optimal multivariable regulatory controllers with model following capabilities," *Automatica*, Vol.8, PP.247-262, 1972.
- [ 86 ] H.G.Kwatny, "Turbine-generator system control for a HTGR power plant," *Automatica*, Vol.16, PP.265-279, 1980.
- [ 87 ] I.D.Landau, "A Survey of model reference adaptive techniques theory and applications," *Automatica* Vol.10, PP.353-379, 1974.
- [ 88 ] K.Narendra, "Direct and indirect model reference adaptive control," *Automatica* Vol.15, PP.653, 1979.
- [ 89 ] IVAJK, "Adaptive load frequency control of the Hungarian power system," *IFAC conference*, 1985.
- [ 90 ] R.E.Kalman, "Design of a self-optimizing control system," *Trans. ASME*, Vol.80, PP.468-478, 1958.
- [ 91 ] G.T.Berezna, "Adaptive control of Nuclear reactor," *IEEE NS18*, No.4, PP.387-397, 1971.
- [ 92 ] G.T.Berezna, "Adaptive Nuclear reactor control based on optimal low order linear models," *IEEE NS-19*, P72-82, 1972.
- [ 93 ] P.D.Macmorran, "MVPACK manual"
- [ 94 ] N.S.Wells, "AECL offers a smaller CANDU," *Nuclear reactor engineering international*.
- [ 95 ] A. Pearson, "Nuclear power plant control beyond the 1980s," *IEEE NS-27*, No.1, PP.18-22, 1980.
- [ 96 ] P.V.Girija, "Optimal control of a BWR," *Annual Nuc Energy*, Vol.3, PP.133-135, 1976.
- [ 97 ] M.Gopal, "A new optimal control strategies for a BWR," *IEEE NS-32*, PP.1180-1189, 1985.
- [ 98 ] W. Ciechanowicz, "On transient digital control of a linear model of the Halden BWR," *Nuc Sci & Tech* Vol.41, PP.281-293, 1970.
- [ 99 ] T.J.Bjorlo, "Digital control of the Halden BWR by a concept based on modern control theory," *Nuc. Sci & Tech*, Vol.39, PP.231-240, 1970.
- [ 100 ] E.J.Davison, "On the control of a large chemical plant by using modal analysis," *Automatica*, Vol.18, P263-273, 1972.
- [ 101 ] A.G.J.Macfarlane, "A survey of some recent results in linear multivariable feedback theory," *Automatica* Vol. 8, PP.455-492, 1972.
- [ 102 ] Chang Chien Hang, "Comparative Studies of MRACS," *IEEE AC-15*, PP.419-428, 1973.

- [103] I.D.Landau, "Unification of discrete time explicit model reference adaptive control designs," *Automatica*, Vol.17, PP.593-611, 1981.
- [104] H.Kurz, "Experimental comparison and application of various parameter adaptive control algorithms," *Automatica*, Vol.16, PP.117-183, 1980.
- [105] N.G.Brun, "Multiloop, feedforward, model and optimal control of an evaporator, *Automatica*," PP.269-280, 1979.
- [106] H.H.Rosenbrock, "Distinctive problems of process control," *chemical Eng progress*, Vol.58, No.9, PP.43-50, 1962.
- [107] ARNE TYSSO, "The design of a multivariable control system for a shipboiler," *Automatica*, Vol.12, PP.211-224, 1976.
- [108] H.Y.Cheung, "Adaptive Kalman gain approach to online instrument failure detection with improved GLR method and suboptimal control on LOFT pressurizer," *IEEE NS-33*, No.4, PP.1103-1114, 1986.
- [109] G.T.Park, "Application of adaptive control to a nuclear power plant," *Nuc Sci & Tech*, Vol.94, PP.145-156, 1986.
- [110] G.T.Park, "Self-tuning control application to a nuclear power plant," *Int.J.control* Vol.43, No.6, PP.1823-1840, 1985.
- [111] 김동화, 홍석교, "INA를 이용한 원전의 다변수제어기 설계," '87 대한전기학회 춘계학술대회 논문집.
- [112] "Advances in control systems," *Academi press*, 1960.
- [113] B.Frogner, "Control of nuclear power plants," *IEEE Vol.AC-23*, No.3, P405-417, 1978.
- [114] 김동화, 홍석교, "센서고장에 대해 보전성을 갖는 터어보-발전기 시스템의 강인제어기 설계," *한국 조명. 전기설비 학회지*, Vol.5, No.3, PP.64-71, 1991.
- [115] 김동화, 홍석교, "INA법에 의한 다변수 원자력 발전소의 제어기 설계," *대한전기학회 논문지*, vol.39, No.10, PP.1086-1097, 1990.
- [116] 김동화, "Linear regulator 기법을 이용한 발전설비의 최적제어," *한국 조명.전기설비 학회지*, Vol.4, No.4, PP.61-67, 1990.
- [117] 김동화, 홍석교, "INA법을 이용한 원자력 발전소의 다변수제어," *대한전기학회 '87년도 춘계학술대회 논문집*.
- [118] 김동화, "케환회로 고장에 대해 강인성을 갖는 다변수 시스템의 비간섭 제어," *한국통신학회*.
- [119] 김동화, 상태케환을 이용한 다변수 시스템의 강인 비간섭 제어," *한국조명.전기설비 학회*.
- [120] 김동화, "Computer aided multivariable control system design," *KAERI/RR-96/86*, 한국에너지연구소
- [121] 김동화, "현대제어 이론을 이용한 원자력 발전소의 제어기술," *KAERI/AR-328/91*, 한국원자력연구소
- [122] 김동화, "현대제어 이론을 이용한 원자력 발전소의 제어기술 현황 및 전망," *한국조명.전기설비 학회잡지*, Vol.4, No.3, PP.192-200, 1990.

## 저 자 소 개



**김동화(金東和)**

1949년 11월 15일생. 1978년 명지대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 아주대 대학원 전자공학과 졸업(공학박). 1985년-86년 캐나다원자력공사(AECL)연구. 1977년-93년 한국원자

력연구소, 현재 대전산업대 제어계측공학과 교수.