

# 이상검출 및 진단에 관한 연구 동향

홍일선, 권오규, 김대우

(국방과학연구소, 인하대 전자·전기·컴퓨터 공학부)

## 1. 서론

공학에서 추구하는 목표는 대상시스템의 신뢰성(Reliability), 가용성(Availability), 안전성(Safety)을 높이는 것이라고 말할 수 있다. 이러한 목표들은 시스템의 안정화된 운전을 통하여 좋은 특성의 제품 또는 성능을 얻기 위한 것이며, 세 항목 가운데서도 신뢰성이 가장 기본적인 목표라고 할 수 있다. [1][9]

시스템의 신뢰도를 향상시키기 위한 방법으로는 고장회피(Fault avoidance)와 고장허용(Fault tolerance) 방법을 사용한다. 고장회피법은 아주 높은 신뢰도를 가진 부품을 사용하여 고장발생 확률을 줄임으로써 시스템의 신뢰도를 높이는 방법이다. 그런데 이 방법에서는 개별 부품의 신뢰도에 따른 고장 발생 확률을 가지고 있으므로 부품별 고장에 따른 기기의 고장이 발생되고, 이로 인하여 전체 시스템의 신뢰도가 저하되고 시스템의 안전성을 해치게 되어 가용성을 떨어뜨리게 된다.

고장허용법이란 어떤 시스템의 기기나 부품이 고장났을 경우에도 신속히 적절한 조치를 취함으로써 전체 시스템은 계속적으로 정상 동작하도록 시스템의 신뢰도를 높여서 가용성, 다중성 및 안전 운전(Failsafe) 등을 얻는 방법이며, 이상검출, 고장 격리, 고장 조치 등의 3단계로 구성된다.

어떤 시스템에서 고장(Failure)이란 파급상황이 이미 치명적이어서 운전을 중단해야 하는 경우를 말하는데, 고장허용법에서는 이러한 고장이 발생하기 전에 고장의 원인이 되는 징후, 즉 시스템의 이상(Fault)을 미리 파악하여 적절한 조치를 취함으로써 부분적 이상이 발생하더라도 전체 시스템의 운전 중단을 막을 수 있으며, 이상검출 및 이상진단의 기본목적이 여기에 있다.

일반적으로 어떤 공정(Process)의 안전운전을 해치는 이상이나 오류(Error)의 대표적인 형태는 다음과 같다.

- 물리적 또는 화학적 변화에 의해 야기되는 시스템 구성 요소의 이상 현상
- 외부에서 공급되는 입력 조건의 오류에 의한 이상 현상
- 환경에서 발생하는 외란 또는 외부 간섭
- 운전자 오류

- 정비 실수 및 잘못된 수리로 인하여 발생하는 이상 현상
- 제어 시스템의 이상 현상

시스템 설계 및 운전 과정에서 이상검출 및 진단법은 위에 언급한 바와 같은 이상 현상을 미리 발견하여 이상 현상이 다른 부분으로 전이되어 가는 것을 막고 안전한 시스템으로 구축하는 것을 목표로 한다. 이상검출 및 진단 기법이란 시스템의 성능 저하를 예측하여 검출하고, 성능 저하가 미치는 영향을 평가하여 평가결과에 따라 적절한 조치를 취하는 것으로 생각할 수 있다. 그런데 현재 현장에서 많이 사용되고 있는 이상검출 및 진단 기법은 출력단에서의 계측치를 직접 이용하는 방법으로 동작점 및 입력 조건의 변화에 따른 사항은 운전자가 판단하는 형태를 취하고 있다. 이러한 방법의 단점은 시스템 내부의 상태변화에 의한 출력 변화와 시스템이 복잡한 경우에 이들 간의 상호관계를 운전자가 정확히 파악할 수가 없어서 운전 오류를 유발하게 된다는 점이다. 따라서 최근의 산업공정에서처럼 시스템이 대형화되고 요구되는 기능이 많아질수록 이러한 시스템의 안전운전을 위해서 시스템 내부의 상태 및 입출력 조건 등을 고려한 보다 정교한 이상검출 및 진단 기법이 필요하게 된다.

지금까지 제시된 이상검출 및 진단기법은 대상시스템의 모델은 이용하지 않고 출력신호들만을 사용하는 "무모델(Model free) 기법"과 대상시스템의 모델을 이용하는 "모델기반(Model-based) 기법" 등의 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 이 중에서 무모델 기법은 이상검출 및 진단분야의 초기에 많이 쓰이던 방식으로서, 물리적 중복도(Physical redundancy)를 이용하여 이상여부를 판단하는 "다수결(Majority voting) 기법"과 출력신호의 분석에 의한 "신호검증 기법" 등이 있다. 이 방법은 지금도 대형공정의 이상검출 및 진단에 부분적으로 활용되고 있다.

모델기반 기법은 관측자를 이용하거나 계수추정자를 이용하는 "해석적 방법"과 전문가 시스템을 이용하는 "추론적 방법" 등이 있는데 이 글에서는 이 가운데 해석적 방법을 중심으로 이 분야의 연구동향을 고찰해보고자 한다. 해석적 방법을 이용한 모델기반 이상검출 및 진단의 개념은 그림 1에서 보는 바와 같다.

게 되며, 이때 상호 비교평가 및 검증기법에 관련된 사항은 원자로 안전운전을 위한 신호 검증기법에서 많은 연구가 진행되어 있다.

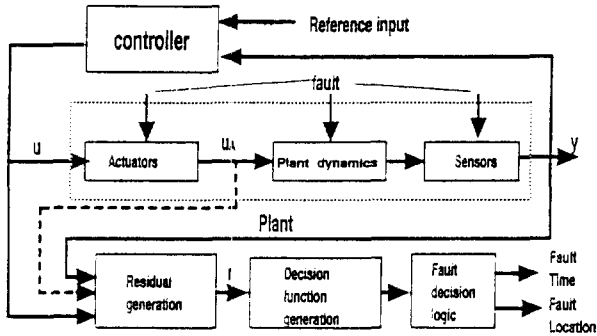


그림 1. 해석적 기법을 이용한 개념도

## 2. 무모델 이상검출 및 진단법

이 절에서는 우선 공정의 모델을 사용하지 않고 이상검출 및 진단을 수행하는 기법을 살펴보기로 한다. 먼저 검출 및 진단 과정에서 사용되는 신호시험 기법을 살펴보고, 그 다음에는 관리도(Control chart)를 이용한 기법을 살펴보기로 한다. 그리고 회전기기 등의 기계분야에서 많이 사용되는 진동 계측을 이용하여 진단을 행하는 경우와 전문가시스템을 사용하는 기법에 대해 살펴본다.

### 2.1 신호시험 기법

이 기법은 모델을 사용하지 않고 플랜트의 출력신호를 직접 이용하여 이상검출 및 진단을 행하는 방법이다. 입력신호를 계측할 수 없는 환경이거나, 출력만이 관심인 경우에 주로 행하게 되는데, 그 대표적인 경우가 “한계 검사(Limit checking) 기법”이다. 이 방법은 플랜트의 측정변수값을 미리 설정한 정상 운전의 한계치와 비교하여 이 한계치를 넘는 경우 그 변수의 기능이 비정상적임을 알리고 그 변수에 해당되는 기기의 고장을 지적하는 방법이다. 보통 두 단계의 설정치를 사용하여 첫 단계는 경고 단계, 두 번째 단계는 조치 단계로 구성된다.

이 기법은 플랜트 자체보다는 측정 센서의 이상 발생 여부를 파악하는 데에 우선 적용할 수 있다. 이 방법을 센서의 이상 유무 시험에 적용할 경우에는 사전 시험 기법과 실시간 시험 기법으로 구분할 수 있다. 사전 시험 기법은 사전에 센서에 대한 교정을 행하고 교정 계수를 비교, 검토함으로써 센서의 이상 유무를 찾는 방법이다. 실시간 시험 기법은 시스템이 운전중인 상황에서 센서의 이상 유무를 판단하는 방법인데, 이 기법으로 센서의 이상 유무를 찾아내는 가장 손쉬운 방법은 같은 변수들을 측정하는 센서를 다중으로 사용하여 비교 평가하는 것이다. 일반적으로 플랜트의 주요 변수들은 다중 센서를 설치하여 측정 채널의 이상 유무를 상호 비교 평가에 의하여 찾아내는 방법을 사용하

### 2.2 관리도 이용 기법

관리도는 1924년 W. A. Shewart에 제시되어 공정 관리 분야에서 많이 사용되며, 순차적으로 얻어지는 공정의 신호를 통계적인 관점에서 처리하는 것으로 경향 감시 분야에서 많이 적용되고 있다. 이 개념은 한계검사 기법과 유사하나 자료를 관리하는 데에 통계적 기법이 도입된다는 점이 다르다. 자료에 대한 판별은 중심선과 상한 및 하한의 범위를 설정하는 방법에 따라 평균값을 이용하거나, 자료의 범위값을 이용하여 산포도를 통제하는 경우, 표준 편차를 이용하는 경우, 산술 평균 대신 중앙값을 사용하는 경우로 구분 지을 수 있다. Himmeblau(1978)<sup>[41]</sup>는 이상 검출 및 진단 기법에 Shewart의 관리도 이용 기법을 제시하였으나 이 기법의 단점은 다음과 같다.

- ① 상한 및 하한의 한계치 설정에 사용되는 식이 부정확하다.
- ② 관리도를 작성하는데 사용되는 자료의 채취나 소그룹 선정 계획이 부적절하다

이러한 문제점들을 개선하기 위한 방안으로, 공정의 계수 변화가 작은 경우는 Shewart 관리도 대신 누적합(Cumulative sum)을 사용하는 기법도 있다. 누적합 기법은 순차적으로 들어오는 자료와 평균값과의 차이를 누적하거나 일정 기간 표본을 취하는 형태로 이루어진다. 이 기법의 장점은 공정의 평균값이 변화했거나 변화를 야기시킬 수 있는 원인들을 조사할 수 있다는 점이다. 이외에 Box and Kramer(1992)<sup>[42]</sup>의 통계적 공정제어(Statistical process control) 기법과 자료의 개수 및 가중 형태에 따라 ARL(Average run length)기법, EWMA(Exponentially weighted moving average) 관리도 기법 등이 제시되고 있다.

이 절에서 살펴본 관리도를 이용한 기법에서는 단순한 자료의 수집으로 정상상태와 이상상태 간의 구별이 가능한 의사 결정 과정이 포함되어 있다는 점을 장점으로 들 수 있으며, 고려할 사항으로는 자료의 크기 및 채취 회수, 사용할 통계적 기법, 이상 경고 등의 조치를 위한 경계점 선정 등이 필요하다.

### 2.3 신호 분석기를 이용한 기법

기계의 상태를 조사하는 데에는 진동 및 음향 신호를 계측 분석하는 기법을 많이 사용한다. 기계적 힘에 의해 발생하는 기계 진동 및 잡음은 기계 자체의 이상 현상을 유발시키거나, 진동 경로를 통하여 다른 곳으로 전파되어 원하지 않는 변화를 유발하게 되며, 발생한 이상 현상은 실제적인 오동작을 일으키거나, 기계의 동작 조건에 변화를 일으

기계 된다. 예를 들어, 고속 회전체의 경우, 축의 편심은 대형 사고를 유발시킬 수 있어, 고속 회전체에는 진동 계측 장치가 반드시 설치된다. 플랜트의 정상 운전 상태에서 음향 및 진동 등은 고유의 주파수 스펙트럼을 지니게 된다. 이 신호들의 정상 작동 때의 스펙트럼을 기준으로 하여 기준에서 벗어나는 스펙트럼이 나타날 때 이 기계를 비정상적으로 진단하게 된다. 회전기계의 경우 진동 분석을 통하여 이상 검출 및 진단을 행하는 방법으로는 진동 주파수 분석법, 진동의 방향이나 형태를 분석하는 방법 등이 제시되고 있는데 이 방법들을 간략히 정리하면 다음과 같다.

- 1) 주파수 분석 방법 : 이 방법은 각 부분별로 진동을 유발시키는 진동원의 주파수가 다르다는 점에 착안한 것이다. 예를 들어, 회전자의 평형이 이루어지지 않은 경우 회전자의 회전수에 해당되는 주파수의 진동이 나타나고, 축이 휘어진 경우는 회전수의 기본 및 2배, 3배의 진동이 동시에 나타나게 된다. 따라서 진동 신호에 대한 주파수 분석은 진동원을 찾는 데 한 방안이 될 수 있다.
- 2) 방향 분석법 : 이 방법은 진동 방향이 방사(Radial) 방향, 축(Axial)방향 중 어느 방향으로 특징적으로 발생하고 있는가를 조사하는 것이다. 회전자(Rotor)의 평형 불량인 경우에는 방사방향으로, 결합(Coupling) 불량인 경우는 축방향으로 큰 진동이 발생하게 된다.
- 3) 형태 분석법 : 이 방법은 발생하고 있는 진동의 원인을 규명하는 것으로, 전기적 또는 기계적인 것인지를 구별하고, 기계적인 경우 강제진동 또는 공진이나 자려진동 여부를 판별하는 것이다. 이 방법에서는 진동 신호의 위상분석을 수행하여 강제 및 자려진동 여부를 가리게 된다.

이러한 진동 분석 기법을 통한 이상검출 및 진단에는 다음과 같은 항목들의 준비가 필요하다.

- ① 기계의 기계적 특성 (고유 진동수, 감쇠 계수 등) 파악
- ② 기계에 발생 가능한 기계적 오동작과 징후에 대한 종류 파악
- ③ 기계의 상태에서 변화를 나타낼 수 있는 중요 변수 감지
- ④ 진단 자료를 즉시 판독 가능한 형태로 변환
- ⑤ 기계의 상태를 변화시킬 수 있는 기록과 관련된 사건(Related event)의 이해
- ⑥ 진단을 통한 적절한 조치 수행

### 2.4 전문가 시스템 방법

플랜트의 많은 측정 정보 및 주변 정보로부터 운전 경험자에 의하여 이상 유무를 진단하던 종래의 방식을 데이터 베이스화 하는 것으로 앞에서 언급된 기법을 포함하여 사용되며, 상위의 개념으로 볼 수 있다. 이것은 하드웨어나 소프트웨어에 의해 얻어진 증상들을 전문가적인 판단이나 평가 논리에 의해 분석

하여 고장 여부를 결정 짓는 방법이다. 이 방법에는 플랜트의 모델 대신 경험적 지식을 바탕으로 하는 추론 기능이 포함된다. 추론 방법에는 조건(If-then) 규칙, 퍼지(Fuzzy) 추론, 신경 회로망 추론 등을 사용한다. 이 방법은 모델을 사용하는 경우에 생기는 불확실성, 모델링 과정의 어려움, 운전 방식(Mode)의 변화 등에 따른 동특성 변동으로 인한 수학적 모델의 부적합성을 극복하고, 추론을 행할 수 있다는 장점을 지니고 있어 많은 연구가 진행되고 있으나, 신뢰도 있는 추론이 되기 위해서는 많은 경험적 자료를 이용하여 규칙을 만들어야 하며, 검증 과정을 거쳐 추론 과정의 신뢰성을 먼저 확보하여야 하는 문제점을 내포하고 있다.<sup>[23]</sup>

### 3. 모델기반 이상검출 및 진단법

모델을 이용한 이상검출 기법은 플랜트의 수리적 모델과, 측정 가능한 입출력 신호를 이용하여 여유도를 발생시키는 형태로 구성되며, 여유도의 생성과 평가 방식에 따라 잔차(Residual, Innovation) 발생기와 잔차 평가 기법으로 구분되며 개략도는 그림 2와 같다. 이 기법을 적용하는 과정에서 고려할 항목은 검출 지연 시간, 검출 확도, 오경보(False alarm)율, 격리 가능성, 감도, 견실성 등이며, 적용 목적 및 대상에 따라 고려할 항목을 선정하게 된다.

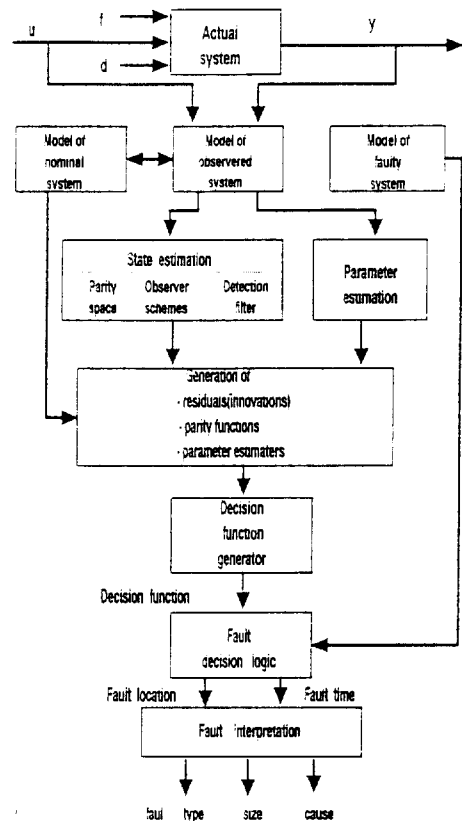


그림 2. 모델을 이용한 이상검출기법의 개략도



식 (3), (4)를  $\gamma(k)$ 에 대입 정리하면 다음과 같다.

$$\gamma(k) = v^T \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^s \end{bmatrix} x(k-s) \quad (7)$$

잔차의 발생은 식(7)과 같이 이루어지는데, 여기에서  $\gamma(k)$  값이 영이면 이상이 없음을 나타내고,  $\gamma(k)$  값이 영이 아니면 이상이 발생한 것으로 간주하게 된다.<sup>[3][6][7]</sup> 이 등가식 접근법은 관측자를 이용한 기법의 한 종류 즉 무진동 관측자(Dead-beat observer)의 경우로 분류되고 있으며, 이 경우에 대한 관계는 단일 입출력의 경우는 Massoumnia<sup>[14]</sup>, 다변수의 경우는 Frank<sup>[16]</sup>에 의한 연구 결과가 제시되고 있다.

이 방법은 모델링 오차가 있는 불확정 시스템이나 비선형 시스템에는 적용이 어려운 점을 지니고 있으며, 이 문제점을 개선한 형태로 Patton<sup>[43]</sup>은 모델링 오차가 있는 경우에 대한 연구 결과들을 제시하기도 한다. 이 기법의 장점은 이상검출 속도가 빠른 점과 이상격리에 편이성을 제공한다는 점이며, 단점으로는 이상의 크기에 대한 정보를 파악할 수 없다는 점이다.

**2) 관측자 이용법 :** 이 기법의 기본 개념은 이상검출 및 진단을 위한 잔차 발생을 관측자의 경우는 상태추정 오차를, Kalman 필터를 이용하는 경우는 필터의 잔차를 이용하여 측정치로부터 시스템의 출력을 재구성하는 것이다.<sup>[36]</sup>

폐로 시스템에서 상태 추정의 개념은 등가식의 정의와 일치하며, 상태 추정을 이용한 이상검출 및 진단기법의 개념은 그림 3과 같다.

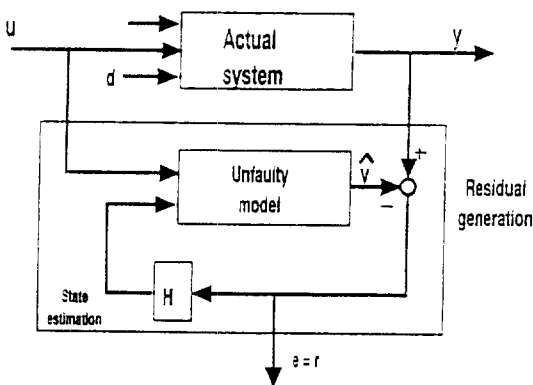


그림 3. 상태추정을 이용한 기법의 개념도

관측자를 이용한 이상검출 및 진단 기법은 계측기(Instrument) 이상검출(IFD), 부분(Component) 이상검출(CFD), 구동기(Actuator) 이상검출(AFD) 등의 세 가지로 나눌 수 있다. 이중에 IFD기법은 관측자 설계에 따라 DOS

(Dedicated Observer Scheme)과 SOS(Simplified Observer Scheme), GOS(Generalized Observer Scheme)으로 구분된다. CFD기법에서는 시스템을 분해하고, 분해된 부분에 대한 관측자의 계층적 개념을 적용하는 것이 주된 문제로 볼 수 있으며, 시스템 전체가 관측 가능하지 못할 때에도 분해된 시스템의 관측 가능성으로 관측자를 구성 가능하다는 장점을 지닌다. 전차수 관측자(Full order observer)를 이용할 때에는 시스템 모델과 출력추정을 행하기 위한 공칭모델을 병렬로 구성하는데, 여기서 추정된 잔차를 공칭모델로 되먹임시킨다. 그 이유는 초기조건 차이점을 보상하기 위한 것과, 시스템이 불안정한 경우 공칭모델의 안정화, 그리고 어떤 임의의 이상 상황을 다른 이상 상황 및 미지입력과의 분리하고자 하는 데에 있다. 전차수 관측자와 비슷한 방법으로 축소차수관측자나 비선형 추정자를 이용할 수도 있다. 비선형 추정자에 대해서는 이론적 연구는 많이 진행되고 있지만 FDI로의 적용은 아직 미비한 실정이며, Wunnenberg와 Frank 등이 1990년에 제시한 비선형 분해 방법을 이용한 FDI로의 접근법등 몇몇 연구만이 발표되고 있다.<sup>[10][16][18][22][31]</sup>

**3) 검출필터 이용법 :** Edelmayer<sup>[27]</sup> 등은  $H_\infty$  필터를 이상검출용 필터로 이용하여 이상을 검출하는 방법을 제시하였다.  $H_\infty$  필터는 외란에 견실한 성능을 지니고 있기 때문에 이상검출을 수행할 때 외란의 영향을 배제할 수 있다는 장점을 활용하여 이 기법이 제시된 것이다. 이 기법의 목표는 다음과 같다. 첫째, 필터의 출력 오차에 대해 외란과 미지의 입력에 의한 전달 함수의 크기가 사전 결정된 크기보다 작아지도록 하는 것이며, 둘째로 이상 현상에 대하여 감도를 유지하는 것이다. 이러한 기법은  $H_\infty$  제어 및 추정에서 전개된 이론들을 이용하여 검출 필터를 구성하는 형태로 최근에 많은 연구 결과가 제시되고 있다.<sup>[9][11][14][27]</sup>

3.2.2 계수추정 이용 기법

계수추정 접근법은 입출력 자료로부터 무지(無知)상자(Black box) 입출력 모델을 설정하고 계수추정을 행하는 방법으로 추정된 계수의 통계적 분포로부터 이상 발생 여부를 판단하게 되는데 계수추정 기법이 지니는 견실한 특성을 이용하게 된다. 이 기법의 개념은 그림 4와 같으며, 적용과정은 다음과 같은 6단계로 이루어진다.<sup>[17][19][20][21]</sup>

- ① 공정의 계수 모델  $y(t) = G[u(t), \theta]$ 을 선정한다.
- ② 모델 계수  $\theta$ 와 실제 시스템 계수  $p$ 와의 관계를 선정한다.
- ③ 측정된 입출력 자료를 이용하여 모델 계수  $\theta$ 를 추정한다.
- ④ 추정된 계수  $\theta$ 에서 시스템 계수  $p$ 를 산출한다 :  $p = f^{-1}(\theta)$

- ⑤ 공칭값  $p_0$ 에서 계수의 변화량(잔차)  $\Delta p$ 를 산출한다.
- ⑥  $\Delta p$ 에 대해 이상 발생 여부에 대한 의사 결정을 한다.

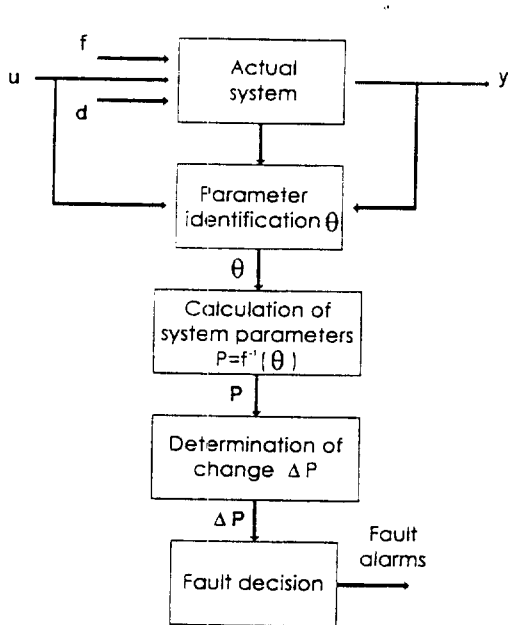


그림 4. 계수추정 이용기법의 개략도

계수추정 알고리즘은 크게 일괄처리(Batch)형 알고리즘과 순환형 알고리즘으로 나눌 수 있으며, 이론적 전개는 일괄처리형 알고리즘이 쉬우나 실시간 적용에는 순환형 알고리즘이 적합하다. 이 기법의 장점은 이상에 대해 발생과 크기를 파악하기가 쉽다는 점이지만, 이상진단이 어렵다는 단점이 있다.

1) 일괄처리 알고리즘 : 계수추정 과정에서 최소 자승법등을 이용하여 사전에 추정된 계수와 비교하는 형태의 알고리즘으로 무지상자 식별 접근법과 확률군사(Stochastic embedding) 접근법 등이 있다.<sup>[15]</sup> Kwon<sup>[15]</sup> 등은 전달함수 시스템에서 모델링 오차의 통계적 성질을 정의하고 계수추정 과정에 그 영향을 고려하는 방법을 제시하고 있다. 즉 계수추정 과정에서 모델링 오차와 잡음의 영향을 정량화하고 시험변수 구성에 그 값을 사용하는 방법으로 시험변수에 모델링 오차 및 잡음의 영향을 고려되어 있어 이상발생 여부 판단에 사용되는 문턱값(Threshold) 선정에 다소 편의성을 제공한다. 또한 계수추정 과정에 입출력 신호를 사용하므로 동작점 변경 및 입력 신호의 변경도 같이 고려되는 장점을 지니고 있다.

2) 실시간 처리 알고리즘 : 실시간 처리 알고리즘에는 일괄처리 형태의 계수추정 알고리즘을 순환형 알고리즘으로 변환한 형태와 계수추정 과정에 Kalman 필터를 사용하는 경우가 있다. 여기서 순환형 최소자승법에서 수정된 알고리

즘의 몇 가지 예를 들면 다음과 같다.

- ① 망각 계수 이용 방법
- ② 계수추정 과정에서 Kalman 필터를 사용하는 경우
- ③ 자료의 크기를 제한하기 위하여 이동구간(Sliding windows)을 이용하는 경우

실시간 이상 검출을 위한 계수추정 알고리즘은 두 가지의 사항을 만족할 수 있어야 한다. 첫째는, 추정에 사용되는 자료의 가중치에 대한 문제이다. 이 사항은 사용되는 자료의 크기에 따라 검출 속도 및 정확도 등에 연관된다. 둘째는, 실시간 검출을 위한 순환형 알고리즘의 형태이어야 하고 연산이 편리한 형태로 단순화가 이루어져야 한다. 이 사항은 계수추정에 사용되는 알고리즘의 개발 환경이 안정성과 수렴성을 위주로 하기 때문이다.

### 3.3 의사 결정 시스템

모델을 사용한 이상검출 및 진단 기법은 잔차 발생기와 생성된 잔차에 대해 의사 결정(Decision making)을 행하는 과정으로 나누어 볼 수 있다. 의사 결정 과정은 발생하는 잔차에 대하여 이상 현상의 가능성을 조사하는 것을 말한다. 의사 결정에 필요한 함수나 통계적 특성은 잔차의 구성에 따라 행하여지고, 의사 결정 규칙은 이상이 발생된 경우에만 적용되어 진다. 일반적으로 의사 결정 과정은 설정된 문턱값에 대하여 매시간의 잔차의 크기를 비교하거나 평균값을 이용하여 그 크기를 비교하는 형태를 취한다.<sup>[12][13][14]</sup>

잔차에 대한 평가는 진단을 행하는 과정에 포함된 문턱값 시험에 포함된다. Kalman 필터를 사용하는 경우 문턱값 시험에 통계적 처리가 포함되지만 관측자 기법 및 등가식 접근법에서는 잔차에 대한 시험 과정에 통계적 기법을 처리하기가 어려운 점이 있다.

#### 3.3.1 잔차 문턱값 선정

문턱값은 발생한 잔차에 대해 이상 여부를 판단하기 위하여 사용된다. 그런데 문턱값 선정 과정에서 고려하여야 할 사항은 모델링 오차, 잡음의 성질, 검출 필터의 속도, 기준 및 이상 신호의 종류 등으로 들 수 있다. 이러한 사항은 문턱값 선정에 난점을 일으키게 되며, 이러한 문제를 극복하기 위하여 Clark<sup>[18]</sup> 는 적응 문턱값(Adaptive threshold) 방법을 제시하였으며, Emami-Naeini<sup>[12]</sup> 등은 Clark의 개념을 시간 영역에서 확장하여, 시간 영역에서 문턱값 선정 방법에 대한 체계화를 처음으로 시도하였으며, Frank<sup>[16]</sup> 등은 주파수 영역에서 계측기 및 부분 이상인 경우 문턱값 선정에 일반적인 해를 제시하고 있다.<sup>[11]</sup>

#### 3.3.2 통계적 기법

잔차를 이용하여 이상 발생여부에 대한 의사 결정 과정에 사용되는 통계적 기법은 다음과 같이 생각할 수 있다.

- ① 통계적 성질 분석
- ② 순차 확률비 (SPRT : Sequential probability ratio) 시험
- ③ 일반 공산비 (GLR : Generalized likelihood ratio) 시험
- ④ 다중가설 (Multiple hypothesis) 시험 : 다중 모델 적응 필터 이용

1) 통계적 성질 분석 : 이 기법은 백색성(Whiteness) 시험, 평균값(Mean) 시험, 상호 분산 시험, WSSR (Weighted sum-square residual) 기법이 있으며, WSSR의 기법은  $\chi^2$ (Chi-square) 분포표를 이용하여 검출 확도와 오경보 확률사이에서 적절한 선택을 할 수 있다.<sup>[39]</sup>

2) SPRT : 이 기법은 Wald SPRT기법과 Wald SPRT기법에서 하한을 0으로 사용하는 수정된 SPRT 기법, Shiryaev SPRT기법등이 제시되고 있다. Shiryaev SPRT기법은 Speyer와 White가 센서의 이상 검출을 행하는 경우에 예를 보이고 있다.<sup>[21]</sup>

3) GLR기법 : 이 기법은 Kalman 필터의 잔차에 대해 GLR 검출 기법을 이용하여 이상 발생 여부를 판별하는 것으로 Willsky와 Jones<sup>[3]</sup> 등에 의해 제시되었다.

4) 다중가설 시험 : 다중 모델 적응 필터(MMAF)를 이용하여 여러 경우의 조건에 대해 이상 여부를 판별하는 기법은 시스템 식별 및 적응제어 분야에서 개발된 MMAF 이론을 바탕으로 응용에 관련된 연구 결과들이 많이 제시되고 있다. 이는 MMAF 기법이 지나는 자율결정(Self-deciding)의 특성에 의한 문턱값 선정이 필요 없다는 점과, 실제 시스템이 지나는 비선형성과 비정규 분포에도 견실하다는 점에서 많이 사용되고 있다. 또한 이상이 검출된 경우 사용된 필터에서 상태를 추정하여 진단 및 격리가 쉽게 이루어질 수 있다는 점이 있다. 그러나 이 방법은 여러 개의 필터를 구동하여야 하는 점에서 계산량에 대한 문제가 따르고 있다.

### 3.4 견실성 연구

모델 불확실성에 대한 견실성에 관한 연구는 제어계측공학 전반에서 최근에 많은 연구가 집중되고 있는데, 이상검출 및 진단 분야에서도 이에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 견실한 이상 검출을 행하기 위해서 고려하여야 할 항목은 모델의 불확실성, 잡음, 알고리즘의 처리 속도, 기준 신호 및 이상 발생 신호의 종류 등으로 생각할 수 있으며, 견실한 이상 검출 기법 연구에 필요한 사항들은 여러 저자에 의해 지적되고 연구되고 있다.<sup>[2][5][28]</sup>

모델 및 잡음 또는 외란에 의해 발생하는 불확실성에 대해 견실성을 얻기 위한 연구는 최근에 많은 결과들이 발표되고 있다. 모델링 오차 등에 의한 불확실성의 영향을 고려

하기 위하여 시스템에 작용하는 미지의 입력이나 외란으로 표시하고, 외란 분리 형태를 통하여 견실성을 얻는 방법들이 제시되고 있다. 이 방법에서 외란으로 표시되는 양의 크기는 미지의 값으로 취하고 분포 행렬은 주어지는 것으로 가정하고 있으나, 이 분포 행렬을 구하는 방법이 쉽지 않으며, [5]의 연구 결과에 의하면 각 동작점마다 분포 행렬을 계산을 해야 하는 단점을 보이고 있다. 또한 [6]의 연구 결과는 분포 행렬을 구하는 방법을 구체적으로 제시하고 있으나 견실성 보장을 위하여 더 많은 양의 필터가 필요한 것으로 알려지고 있다. 이러한 문제는 관측자를 이용한 기법이 BFDF(Beard fault detection filter)에 근거하는데, 이 BFDF 기법은 견실성을 고려하지 않는 기법이라는 점에서 비롯된 것으로 여겨진다. Khargonekar<sup>[3]</sup> 등은  $L_2$  기법을 이용하여 모델의 불확실성의 크기를 산정하고, 그 값을 이용한 이상검출 기법을 제시하고 있으나, 불확실성을 산정하는 가중치 행렬을 구하는 것이 어렵다는 단점을 보이고 있다.

알고리즘의 처리 속도에 대한 논의는 시스템 식별 분야에서 더 많은 연구 결과들을 보이고 있으며, 실시간 처리를 위한 처리 속도 뿐 아니라 사용되는 모델의 차수와 자료의 개수와 연관되어 진다. 이러한 문제들을 위하여 저차 모델을 사용하는 기법 등이 제시되기도 하나 견실성과 관련된 연구 결과는 미흡한 실정이다.<sup>[4]</sup>

### 3.5 두 기법의 복합형 연구

관측자를 이용하는 기법과 계수추정을 이용하는 기법은 전혀 다른 형태로 발전되어 왔으나 최근 들어 각 방법의 장점을 취합한 복합 형태의 기법들이 제시되고 있다.<sup>[26][30][46]</sup> Gertler<sup>[46]</sup>는 두 기법의 관계를 연구하여, 등가식 접근은 고장 격리에 사용하고 고장의 크기에 대한 판정은 계수추정 기법을 사용하는 방안을 제시하고 있다.<sup>[46]</sup> 또한 Hofling과 Isermann<sup>[30]</sup>은 연속형 등가식을 사용하여 이상 발생에 대한 검출을 수행하고, 이상의 크기에 대한 평가는 계수추정 기법을 사용하는 형태를 제시하고 있다.

한편, 시스템 식별 기법에서 연구되고 있는 반지(半知)상자(Gray box) 식별 기법을 활용하여, 관측자 기법으로는 이상 발생여부 및 발생 부위를 찾고, 그 크기에 대한 평가는 계수추정 기법을 이용하는 형태의 알고리즘을 쓰면 보다 우수한 성능의 이상검출 및 진단 기법을 개발할 수 있을 것으로 기대되며 이에 대한 연구는 계속할만한 필요가 있다.

## 4. 응용 사례

이 절에서는 앞에서 언급한 모델기반 이상검출 및 진단 기법들을 실제공정에 적용하는 응용연구들로서 최근의 국내외의 사례를 살펴보기로 한다.

국내에서는 1990년초 원자력발전소의 증기발생기에 대해서 계수추정법에 의한 이상검출법, 고유구조지정과 미지

입력 관측자에 대한 견실한 이상검출법,  $H_{\infty}$  Filter를 이용한 이상검출법, 모델링오차를 고려한 이상검출법 등에 대한 연구결과가 있다. 이 연구에서 센서 이상에 대하여는 고유구조지정과 미지입력관측자를 이용한 방법이 우수한 성능을 보였고, 공정 이상에 대하여는 모델링오차를 고려한 방법이 그 성능 면에서 우수한 결과를 보였다. 1990년 중반에 160MW급 발전용 보일러에 대한 연구결과가 있는데 이는 시스템의 불확실성을 고려한  $H_{\infty}$  Filter에 의한 이상검출을 시도하였고 우수한 검출성능을 보임을 확인하였다. 역시 1990년대 중반 잠음과 저모델링에 의한 계수추정자의 오차를 구하는 방법으로 비행체의 가스터빈 엔진에서의 이상검출을 시도하여 우수한 성능을 보였고, 이를 바탕으로 무인비행체의 안전 비행을 위하여 센서(자이로, 고도계, 압력계 등)와 구동기, 엔진 등에 발생하는 여러 가지 이상상황을 고려하여 이상검출을 시도하였는데 그 성능이 우수함을 보이고 있고, 현재 이상허용 제어에 대한 연구가 진행중이다. 그러나 국내에서의 연구는 아직 이론적 연구와 모의실험 적용에 머무르고 있으며 실제 공정에의 적용사례는 매우 드물다.

국외에서의 연구는 이론적 연구와 더불어 실제적용 연구도 보고되고 있다. 적용사례를 보면, 1980년대말 미국 국방관련 연구소에서는 해석적 여유도와 전문가시스템을 결합한 이상허용 비행제어를 행하여 그 결과의 우수함을 보고하고 있다. 1950년대 영국에서 60MW급 터빈발전기에 대한 전문가시스템을 이용한 온라인 고장검출 기법을 사용하기 시작하여 현재 1300 MW급에 대해서도 적용하여 좋은 결과를 보이고 있다. 1990년대 중반 영국에서 적응관측자를 이용한 기법을 증류탑의 이상진단에 적용한 결과 적응 갱신규칙(Adaptive update rule)과 계수적설계를 조합한 방법보다 더욱 견실한 결과를 보고하고 있다. 1990년대 중반 역시 프랑스에서는 이상상황이 서서히 증가하는 대표적인 경우로 수력발전소의 이상상황을 다변수 계수추정법을 사용하여 진단을 하여 그 결과를 보고하고 있다.<sup>[12][13]</sup> 과거와 같이 경험에 바탕을 둔 이상, 고장검출방법 보다는 해석적 기법을 사용한 이상검출, 진단 등을 중심으로 다양한 분야에서 연구되고 있다.

## 5. 결 론

이 글에서는 대상시스템의 모델을 기반으로 하는 여러 가지 이상검출, 이상진단 기법 등을 개관하고 간단하게 지금까지 제시된 기법들의 기본원리와 장단점 및 응용 예를 살펴보았다. 그런데 이상검출 및 진단 기법들은 이론적으로 매우 많은 발전을 하고 있지만 실제 시스템에 적용된 예는 아직 많지 않다. 그 원인으로서는 여러 가지가 있겠지만 가장 큰 이유를 든다면 시스템의 수학적 모델에 대한 정보가 부족하다는 데에 있을 것이다. 이 기법들은 모델을 기반으로 하기 때문에 사전에 정확한 시스템 식별(System identification)

을 통한 모델의 정립이 필수적이며, 이러한 조건이 선행된다면 산업현장에서의 응용이 더욱 활발하게 이루어지리라 생각된다.

또 실제문제에 적용할 때에 한가지 더 고려해야할 것은 실시간 처리문제이다. 알고리즘의 정확도는 좋으나 계산량의 과다로 실제 시스템에 적용될 수 없는 경우에는 시스템의 요구조건에 따라 알고리즘의 복잡도나 계산량을 줄여야 하는 연구가 뒤따라야 하겠다. 대부분의 모델기반 기법들은 아주 복잡한 수식의 진개를 필요로 하지만 발상의 전환을 해보면 매우 간단한 아이디어와 간략한 수식만으로도 충분히 설명이 되는 경우가 종종 발견된다. 이것은 어떤 시스템에 대한 충분한 사전지식이나 이해가 뒷받침되었을 때 가능할 것이다.

이 글에서는 이상검출 및 진단 분야의 소개를 위해 복잡한 수식의 열거는 가능한한 피하고 개념설명 위주로 기술하였기 때문에 기본원리의 설명이 불충분하였으리라 생각된다. 자세한 내용에 관심이 있는 분들을 위해 이 분야의 기본문헌에서부터 최신의 참고문헌들까지를 조사하여 열거하였다. 특히 [24]-[40]의 참고문헌들은 최신의 것들로서 이 분야의 최근동향을 구체적으로 파악하고자 할 때에 큰 도움이 될 것이다. 이 글이 국내에서의 이 분야에 대한 발전에 조금이라도 기여하기를 바라며 부족한 글을 맺는다.

## 6. 참 고 문 헌

- [1] A.D. Pouliezos and G.S. Stavrakakis, *Real Time Fault Monitoring of Industrial Processes*, Kluwer Academic Pub., 1994.
- [2] A. Emami-Naeini, M.M. Akhter and S.M. Rock, "Effect of model uncertainty on failure detection : The threshold selector," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, Vol. AC-33, No. 12, pp. 1106-1115, Dec. 1988.
- [3] A.S. Willsky and Harold L. Jones, "A generalized likelihood ratio approach to the detection and estimation of jumps in linear systems," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, Vol. AC-21, No. 2, pp. 108-112, Feb. 1976.
- [4] B. Ninness, G.C. Goodwin, O.K. Kwon and B. Carlsson, "Robust fault detection based on low order models," *Proc. '91 IFAC SAFEPROCESS*, 1991.
- [5] D.T. Horak, "Failure detection in dynamic systems with modeling error," *AIAA paper 87-2604*, pp.1545-1553, 1987.
- [6] E.Y. Chow and A.S. Willsky, "Bayesian design of decision rules for failure detection," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. AES-20, No. 6, pp. 761-773, Nov. 1984.
- [7] E.Y. Chow and A.S. Willsky, "Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, Vol. AC-29, No. 7, pp.



- 603-614, July 1984.
- [8] J.H. Kim and Z. Bein, "Geometric approach for fault diagnosis in linear dynamic control systems," *IEE Proceedings-D*, Vol. 138, No. 3, pp. 293-302, May 1991.
- [9] J.H. Park and G. Rizzoni, "A new interpretation of the fault detection (Part 1) : Closed-form algorithm," *Int. J. Control*, Vol. 60, No. 6, pp. 767-787, 1994.
- [10] J. Chen, R.J. Patton and H. Zhnag, "Design of unknown input observers and robust fault detection filters," *Int. J. Control*, Vol 63, No. 1, pp. 85-105, 1996.
- [11] J.E. White and J.L. Speyer, "Detection filter design: Spectral theory and algorithms," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, Vol. AC-32, No. 7, pp. 593-603, July 1987.
- [12] M. Basseville, "Detecting changes in signals and systems - A survey," *Automatica*, Vol. 24, No. 3, pp. 309-326, 1988.
- [13] M. Basseville, A. Benveniste, G. Moustakides and A. Rougee, "Detection and diagnosis of changes in the eigenstructure of nonstationary multivariable systems," *Automatica*, Vol. 23, No. 4, pp. 479-489, 1987.
- [14] M. Massoumnia, "A geometric approach to the synthesis of failure detection filters," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, Vol. AC-31, No. 9, pp. 839-846, Sep. 1986.
- [15] O.K. Kwon, G.C. Goodwin and W.H. Kwon, "Robust fault detection method accounting for modeling errors in uncertain systems," *Control Eng. Practice*, Vol. 2, No. 5, pp. 763-771, Sep. 1994.
- [16] P.M. Frank, "Enhancement of robustness in observer-based fault detection," *Int. J. Control*, Vol. 59, No. 4, pp. 955-981, 1994.
- [17] P.M. Frank, "Faults diagnosis in dynamical systems using analytical and knowledge-based redundancy - A survey and some new results," *Automatica*, Vol. 26, No. 3, pp. 459-474, 1990.
- [18] R.N. Clark, "A simplified instrument failure detection scheme," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, Vol. AES-14, No. 4, pp. 558-563, July 1978.
- [19] R. Isermann, "Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing -Tutorial paper," *Automatica*, Vol. 29, No. 4, pp. 815-835, 1993.
- [20] R. Isermann, "Process fault detection based on modeling and estimation methods - A survey," *Automatica*, Vol. 20, No. 4, pp. 387-404, 1984.
- [21] S.G. Tzafestas, Ed, *Applied Control - Current Trends and Modern Methodologies*, Marcel Dekker, 1993.
- [22] H. Ajbar and J.C. Kantor, "Time domain approach to the design of integrated control and diagnosis systems," In *The Modeling Uncertainty in Control Systems* (R.S. Smith and M. Dahleh, Ed.), pp. 337-365, Springer Verlag, 1994.
- [23] H. Verbruggen, S.G. Tzafestas and E. Zanni, "Knowledge-based fault diagnosis of technological systems," In *Artificial Intelligence in Industrial Decision Making, Control and Automation* (G. Tzafestas and G.S. Stavrakakis, Ed.), pp 449-506, Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [24] J. Gertler and K. Yin, "Statistical decision making for dynamic parity relations," *Proc. '96 IFAC World Congress*, vol N, pp. 13-18, 1996.
- [25] I. Nikiforov, M. Staroswieckcki and B. Vozel, "Duality of analytical redundancy and statistical approach in fault diagnosis," *Proc. '96 IFAC World Congress*, vol N, pp. 19-24, 1996.
- [26] E.A. Garcia and P.M. Frank, "On the relationship between observer and parameter identification based approaches to fault detection," *Proc. '96 IFAC World Congress*, vol N, pp. 25-30, 1996.
- [27] A. Edelmayer, J. Bokor and L. Keviczky, "H<sub>∞</sub> detection filter design for linear systems: Comparison of two approaches," *Proc. '96 IFAC World Congress*, vol N, pp. 37-42, 1996.
- [28] P. Struss, A. Malik and M. Sachenbacher, "Qualitative modeling is the key to automated diagnosis," *Proc. '96 IFAC World Congress*, vol N, pp. 43-48, 1996.
- [29] H. Wang and S. Daley, "Fault diagnosis using adaptive observer based techniques," *Proc. '96 IFAC World Congress*, vol N, pp. 49-54, 1996.
- [30] T. Hofling and R. Isermann, "Adaptive parity equations and advanced parameter estimation for fault detection and diagnosis," *Proc. '96 IFAC World Congress*, vol N, pp. 55-60, 1996.
- [31] X. Ding and L. Guo, "Observer-based fault detection optimized in the frequency domain," *Proc. '96 IFAC World Congress*, vol N, pp. 157-162, 1996.
- [32] F. Hamelin and D. Sauter, "Robust residual generation for FDI in uncertain dynamic systems," *Proc. '96 IFAC World Congress*, vol N, pp. 181-186, 1996.
- [33] G.A. Murad, I. Postlethwaite and D.W. Gu, "A robust design approach to integrated controls and diagnostics," *Proc. '96 IFAC World Congress*, vol N, pp. 199-204, 1996.
- [34] K. Kumamaru, K. Inoue and T. Soderstrom, "Robust fault detection using index of Kullback discrimination information," *Proc. '96 IFAC World Congress*, vol N, pp. 205-210, 1996.
- [35] P. Albertos, A. Sala and R. Sanchis, "Digital model

parameter estimation with missing data," Proc. '96 IFAC World Congress, vol N, pp. 217-222, 1996.

[36] A. Medvedev, "State estimation and fault detection by bank of continuous finite-memory filters," Proc. IFAC World Congress, vol N, pp. 223-228, 1996.

[37] A. Zolghadri, "Model based fault detection in a multivariable hydraulic process," Proc. '96 IFAC World Congress, vol N, pp. 253-258, 1996.

[38] S. Thapliyal and J.C. Kantor, "Model validation : A novel approach to fault detection," Proc. '96 IFAC World Congress, vol N, pp. 271-276, 1996.

[39] R. Da and C.F. Lin, "Sensitivity analysis of the state chi-square test," Proc. '96 IFAC World Congress, vol N, pp. 277-282, 1996.

[40] M.A. Demetriou, "A model based fault diagnosis scheme for a parabolic distributed parameter system," Proc. '96 IFAC World Congress, vol N, pp. 313-318, 1996.

[41] D.M. Himmelbau, "Fault detection and diagnosis in chemical and petrochemical process" Elsevier, Amsterdam 1978

[42] G. Box and T. Kramer "Statistical process monitoring and feedback adjustment - A discussion" Technometric, vol 34, No 3, p251, 1992.

[43] R.J. Patton and J. Chen "Optimal unknown input distribution matrix selection in robust fault diagnosis", Automatica Vol. 29, No. 4, pp837-841, 1993.

[44] J. Chen. Ron, J. Patton and H. Zhnag. "Design of unknown input observers and robust fault detection filters", Int, J. Control. Vol 63, No. 1, pp85-105, 1996.

[45] P.P. Khargonecker and Thomas L. Ting. "Fault detection in the presence of modelling uncertainty", Proc. of 31th IEEE CDC, pp1716-1721. 1993.

[46] J. Gertler, "Diagnosis Parametric faults from parity equations to identification", Proc. '95 ACC. pp1615-1620. June 1995.

저 자 소 개



**권오규(權五圭)**

1953년 11월 14일생. 1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1988년~1989년 호주 뉴카슬대 전기 전산 공학과 객원 교수. 현재 인하대 공대 전기공학과 교수



**김대우(金臺祐)**

1963년 2월 12일생. 1988년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 인하대 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 1990년~1995년6월 LG산전 연구소 근무. 1995년6월~1996년.1월 국립 공업 기술원. 현재 인하대 대학원 전기공학과 박사 과정 재학중



**홍일선(洪日善)**

1962년 9월 9일생. 1986년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 인하대 대학원 전기공학과 졸업 (석사). 현재 국방 과학 연구소 선임 연구원