

# 이상허용제어에 관한 연구 동향

(\*인하대 전자·전기·컴퓨터공학부)

## 1. 서론

시스템에서 고장(Failure)이란 운전을 중단해야 할 정도로 심각한 비정상적 동작상태를 말한다. 이상허용제어(Fault tolerant control)란 이러한 고장이 발생하기 전에 고장의 원인이 되는 징후, 즉 시스템의 이상(Fault)을 미리 파악하여 적절하게 제어를 수행함으로써 부분적 이상이 발생하더라도 전체 시스템의 운전중단을 막고 계속적으로 정상 동작하도록 시스템의 신뢰도를 높여서 가용성, 다중성 및 안전운전 등을 얻는 기법이라 할 수 있다.

시스템의 신뢰도를 향상시키기 위한 방법으로 초창기에는 아주 높은 신뢰도를 가진 부품을 사용하여 완벽한 설계 및 제조과정을 거침으로써 원천적으로 시스템 요소의 고장발생 확률을 제거하려는 고장회피기법이 고려되었으나 구현과정에서 발생하는 많은 경제적인 문제와 기술적인 한계로 인해서 실용화에 큰 걸림돌이 되었다. 또한, 이 방법에서는 아무리 완벽한 부품을 쓴다 하더라도 개별부품의 고장발생확률은 항상 있으므로 부품별 고장에 따른 기기 고장이 발생되고, 이로 인해 전체 제어시스템의 신뢰도가 저하되고 심지어 시스템의 안정성까지 해치게 되어 가용성을 떨어뜨리게 된다. 이러한 문제점을 극복하기 위해서, 시스템에서 예상할 수 있는 결함 및 이상을 조기에 검출하여 이것이 파급되지 않도록 각 부분별로 적절히 설계해서 이상이 발생하더라도 이상부위에 대한 검출 및 격리, 그리고 신속한 조치를 통해서 그 영향을 최소화하면서 시스템이 정상적으로 임무를 수행할 수 있도록 고안된 것이 이상허용기법이다.

제어시스템의 이상허용성을 유지하기 위해서는 이상의 유형과 특성에 관한 깊은 이해가 필수적이다. 하지만 이상을 유형별로 특성화하고 빈도화 하기가 매우 어렵다. 또한, 영구적인 하드웨어의 결함 또는 고장에 대해서는 잘 모델링될 수 있지만 일시적이고 간헐적인 이상을 모델링하기란 매우 어려운 일이다. 일반적으로 어떤 공정의 안전운행을 해치는 이상이나 오류의 대표적인 형태는 다음과 같이 분류할 수 있다.

- 물리적 또는 화학적 변화에 의해 야기되는 시스템의 구성요소의 이상현상
- 외부에서 공급되는 입력조건외 오류에 의한 이상현상
- 환경에서 발생되는 외란 또는 외부간섭
- 운전자 오류
- 정비실수 및 잘못된 수리로 인하여 발생하는 이상현상
- 제어시스템의 이상현상

이상허용성을 성취하기 위해 최근에 연구되고 있는 제어 기법들은 크게 다음과 같은 두 가지로 분류할 수가 있다.

- 수동적 이상허용 제어기법 : 이 방법에서는 제어기를 하나 또는 그 이상의 시스템 요소의 이상에 대해 견실하게 설계한다. 그러므로, 이 방법을 사용하게 되면 이상검출 및 격리부를 필요로 하지 않고 또한 제어기의 재설정도 필요하지 않다. 그러나 이러한 제어기는 서로 다르게 가 정된 이상상황과 관련한 광범위한 시스템 동작 조건을 처리해야하기 때문에 시스템의 성능은 최적이라 할 수 없다.
- 능동적 이상허용 제어기법 : 이 방법은 시스템의 모든 성능상태를 감시하면서 시스템의 이상을 검출 및 진단하며, 시스템 안정도와 성능을 가능한 한 많이 회복될 수 있도록 실시간 또는 온라인 상에서 되먹임 제어기를 재설정 하는 기법이다.

그리고 위의 두 가지 이상허용 제어기법 모두에서 여분(Redundancy)은 필수적인 구성요소이다. 이상허용 제어시스템 설계하는데 있어 가장 중요한 일 중의 하나는 시스템의 여분을 배치하는 것이라 할 수 있다. 해석적 여분뿐만 아니라 여분의 센서들, 여분의 구동기들 심지어 여분의 제어 루프와 같은 하드웨어 여분도 특히 심각한 고장과 제어 요소의 고장에 대해 설계되어야 할 이상허용 제어시스템에 있어 매우 중요하다.

이상허용제어의 개념은 그림1에서 보는 바와 같다. 일반적으로 이상허용 제어시스템은 구동기와 센서를 포함한 플랜트부, 되먹임 제어기부, 감시부 그리고 이상진단 및 격리부로 구성된다. 이상진단 및 격리부에서는 고장의 징후, 심각한

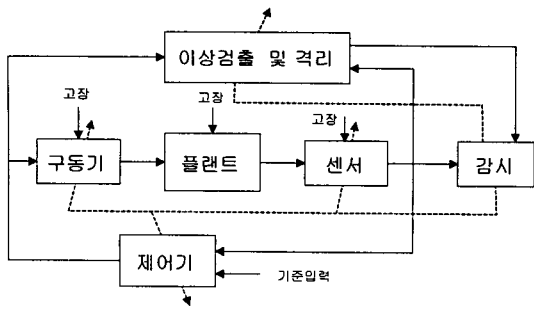


그림 1. 감시기능을 갖는 이상허용 제어기법

그리고 위치에 대한 정보를 감시시스템에 제공하는 역할을 담당한다. 이상진단 및 격리로부터 제공된 고장 결정정보와 시스템의 입출력정보들을 기반으로 감시시스템에서 고장의 격리를 위한 센서 및 구동기를 재설정하고 고장에 의해 파급되는 영향을 수용하기 위해 제어기를 조정하거나 적용시킨다.

이 글에서는 최근에 개발되어 응용되고 있는 이상허용 제어 기법들에 대해 간략히 요약하고 연구동향에 대해 개략적으로 고찰해 보기로 한다.

## 2. 이상허용제어 (FTC: Fault Tolerant Control)

이 절에서는 이상허용 제어기법들에 관한 최근의 연구기법들에 대해서 알아본다. 그림2는 수동적, 능동적 접근법을 기반으로 하는 이상허용 제어기법들에 대한 분류를 보여준다.

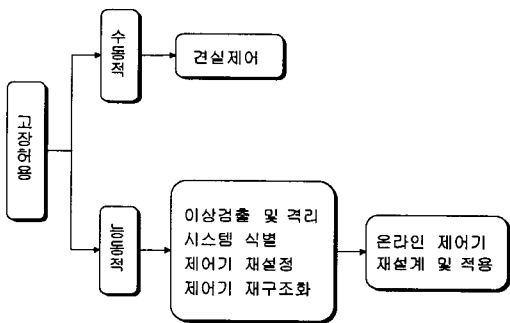


그림 2. 이상허용 제어기법의 분류

### 2.1 수동적 접근법(Passive Approaches)

수동적 접근법은 온라인 상에서 이상에 대한 정보 없이 상수제어계수들을 이용하여 페로시스템이 어떤 이상에 대하여 둔감하게 하는 건설제어기법을 이용한 방법이다. 비록 고장으로 인해 시스템이 손상될지라도 이 방법에서는 제어기 및 구조를 재설정하지 않고 같은 제어기를 이용하여 시스템이 계속 동작하도록 하며 원래 시스템의 성능을 회복하도록

하는 것이 주목적이다. 또한, 이 방법의 효용성은 이상이 없는 경우의 공칭 페로 시스템의 건설성에 크게 의존한다 할 수 있다. 이 접근법에서 고장에 대한 건설성이란 시스템에 대한 고장의 영향이 작은 경우나 복합적 고장이 아닌 하나의 고장상황만을 가정하는 매우 제한적인 범위 내에서 건설하다고 할 수 있다.

제어시스템에 있어 외란과 모델링 오차에 대한 건설성을 확보하는 것은 어려운 일이지만 기본적인 요구사항이다. 왜냐하면, 실제 공정에 대한 정확한 수학적 모델을 얻기가 매우 어렵고 구동기, 센서 그리고 플랜트의 구성요소에 존재하는 잡음과 외란을 정확하게 묘사하기란 불가능하기 때문이다. 만일 고장의 영향이 모델링 오차나 외란의 영향과 유사하다면 이러한 고장들에 대해 둔감하게 하는 제어기를 구성하는데 건설성 문제가 이용될 수 있다.

최근에 수동적 이상허용성을 처리하기 위한 건설제어기법에 관한 연구가 활발히 진행되었다. Horowitz등[20][28]은 건설제어기 설계하기 위해 양적 되먹임 이론을 사용하였고 McFarlane등[33][53]은  $H_\infty$  노름 최적화를 기반으로 한 주파수 영역 접근법을 이용한 방법을 제시하였다. 또한, Nett등[36][38][50]은 4계수 제어기를 기반으로 제어와 이상추정을 통합한 건설설계기법을 제시하였다. 이 방법에서는 제어기를 설계하는데 있어 다음과 같은 성질들을 만족하도록  $H_\infty$  최적화기법이 사용되었다.

- 플랜트의 출력신호는 기준명령입력을 잘 추종하고 구동기 고장에 대해 둔감해야한다.
- 진단출력신호는 구동기의 고장들을 추종해야한다.
- 위의 두 조건은 경계화된 불확실성이 존재할지라도 계속 유지되어야 한다

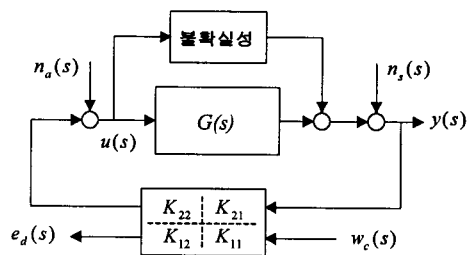


그림 3. 고장 추정기를 갖는 수동적 이상허용제어

4계수 제어기의 구조는 그림3과 같다. 여기서,  $w_c$ 와  $e_a$ 는 각각 외부입력들과 진단 신호이고,  $n_a = f_a + \eta_a$ 와  $n_s = f_s + \eta_s$ 는 각각 센서와 구동기의 잡음과 고장을 나타낸다. 그리고  $u(s)$ ,  $y(s)$ 와  $K_{ij}$ 는 각각 제어신호, 출력신호와 제어계수들을 나타낸다. 제어신호와 고장신호는 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$\begin{aligned} u(s) &= [K_{21} \ K_{22}] \begin{bmatrix} w_c(s) \\ y(s) \end{bmatrix}, \\ e_d(s) &= [K_{11} \ K_{12}] \begin{bmatrix} w_c(s) \\ y(s) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (1)$$



4계수 제어를 이용한 대부분의 연구들은 주로 구동기 고장에 대한 가정을 기반으로 하고 있으나 센서고장에 대해서도 적용이 가능하다.

그러나 이 방법은 제어를 재설정하지 않고 하나의 제어기만을 사용하는 장점을 가지고 있는 반면 다음과 같은 단점들을 가지고 있다.

- 과급영향이 매우 큰 고장들에 대해서는 견실성문제를 명확하게 해결하기 어렵다는 점이다.
- 고장진단과 제어의 역할을 단 한번의 설계절차에서 조합함으로써 설계 자유도들의 균형을 유지하는 방법을 알아내는 것은 매우 어렵다는 점이다.

다시 말하면, 제어기는 이상검출 및 격리과정의 견실성에 대해 영향을 주는 반면, 이상진단을 위한 개로 접근법은 제어기 설계에 어떤 방식으로도 영향을 미치는 않는다는 것이다.

## 2.2 능동적 접근법(Active Approaches)

### 2.2.1 제어법칙 재계획법(Control Law Rescheduling)

이 방법은 이상허용성을 성취하기 위해 이득계수들을 사전에 미리 계산하여 저장하는 방식으로 비행제어, 화학 공정 제어등 많은 분야에서 현재 널리 이용되고 있는 방법이다.[27][30][44][45] 이득 계획법의 주요 특징은 다음과 같다.

- 이상검출 및 격리 구조를 이용한다.
- 제어기 재설정을 위해서 상태추정 정보가 사용된다.
- 제어기 이득과 구조가 미리 계산되고 저장된다.
- 앞먹임 보상에 의해 적절하게 조정된 되먹임 이득이나 구조를 갖는 되먹임 제어시스템이다.

이 접근법은 다양하게 변화하는 조건들에 대해 제어기가 빠르게 대처하고 비교적 잘 알려진 비선형성에 대해서는 보상능력이 뛰어난 장점을 가지고 있다. 반면에 자동조정이 불가능한 경우에는 제어를 설계하는 데 많은 시간이 소비되고, 제어기 계수들은 잘못된 재계획법에 의한 영향을 보상해 주기 위한 페로 시스템의 성능으로부터 되먹임이 사용되지 않고 개로에 있어 재설정되기 때문에 공정의 동력학 또는 외란을 충분히 정확하게 알지못하는 경우에는 이 방법을 사용할 수 없다는 단점이 있다.[5]

이와 같은 사실을 근거로 제어법칙 재계획법의 올바른 동작은 이상검출 및 격리과정의 견실성에 크게 의존한다. 오경보 및 잘못된 격리는 페로 시스템의 성능과 안정도를 크게 해칠 수 있기 때문이다. 이러한 견실성 문제를 기초로 Zheng등[56]은 이상검출 및 격리를 기반으로 한 이상허용 제어방법을 제시하였다. 이 방법에서 이상영향벡터의 함수로 되먹임제어를 조합하는데 있어 선형행렬부등식(LMI: Linear Matrix Inequality) 이론을 사용하고 모델링 에러와 견실성 문제를 해결하기 위해 이상영향벡터의 부정확성을 고려하였다.

### 2.2.2 되먹임 선형화법(Feedback Linearization)

일반적으로 선형제어기들은 상태 및 제어변수들이 동작점 근방에서 작게 변화하는 경우에 잘 동작한다고 알려져 있다. 그러나 구동기 또는 센서 등의 기능불량, 제약조건 및 고장이 발생한 경우에는 페로 시스템의 안정도가 보장을 받지 못한다. 따라서 되먹임 선형화법의 기본 개념은 이러한 비선형성의 영향을 보상하기 위한 방법으로 사용된다.

되먹임 선형화법은 주로 비행제어 분야에 있어 개념이 확립된 기법[29][34][39][46]으로 고장은 반복적인 최소 자승법을 이용하여 이산시간으로 표현되는 운동방정식의 계수를 추정함으로써 간접적으로 검증된다. 추정된 계수들은 제어기의 새로운 계수를 갱신하는데 사용된다. 이 방법에 있어 되먹임 선형화법의 중요한 특징은 제어분배기(CD: Control Distributor)와 일반 입력(GI: Generic Input)이 조합되어 사용된다는 것이다.[39] 제어분배기는 실제 입력벡터를 출력벡터와 같은 개수의 요소들을 갖는 일반 입력벡터로 변환하기 위해 사용된다. 고장이 발생했을 때 제어법칙은 계수교환(Parameter Change)을 기반으로 한 비선형 적용법을 이용하여 바뀌게 된다.

또한 Ochi등[39]은 여기에 구동기 동력학을 고려하였고 일반 입력을 만들기 위해 가상 구동기 개념을 사용하였다.

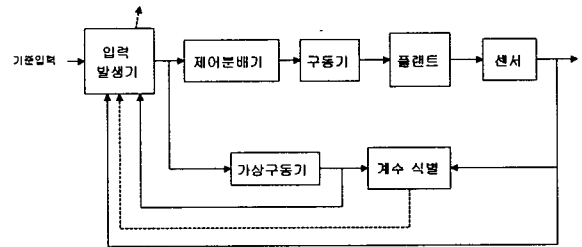


그림 7 되먹임 선형화 접근법

### 2.2.3 모델 추종 접근법(Model-Following Approaches)

모델 추종접근법은 되먹임 선형화법의 대안이라고 말할 수 있으며 기본적으로 다음과 같은 세 가지 방법이 있다.

- 명백한 모델 추종법[35] : 제한된 온라인 고장 수용성, 이상검출 및 격리구조가 불필요.
- 내포적 모델 추종법[23] : 간단한 이상검출 및 격리구조의 사용, 공칭 시스템 고유구조를 유지.
- 다모델 칼만 필터링에 의한 모델 명령 추종법[37] : 고장에 의해 변화가 생긴 동력학을 추정하기 위해 다모델 칼만 필터의 사용, 간단한 이상검출 및 격리구조 사용.

명백한 모델 추종법은 일반적으로 계수변화에 대해 덜 민감하지만 모델의 상태들이 주어져야 하며 되먹임 이득은 원하는 성능을 얻기 위해서 굉장히 큰 값을 갖게된다는 단점이 있다. 반면, 내포적 모델 추종법은 작은 이득으로 원하는 성능을 실현할 수 있으며 가중치 행렬은 플랜트와 모델 동력학식의 차이에 의해 직접적으로 영향을 받는다.

모델 추종 적용제어기는 다음 식(4)와 같은 구조를 갖는

다. 원하는 동특성을 갖는 모델과 제어대상 플랜트를 각각 다음과 같이 고려하자.

$$\dot{x}_m = A_m x_m(t) + B_m u_m(t) \quad (2)$$

$$y_m = C_m x_m(t),$$

$$\dot{x}_p = A_p x_p(t) + B_p u_p(t) \quad (3)$$

$$y_p = C_p x_p(t).$$

그러면 플랜트 출력이 주어진 모델의 출력을 추종하도록 하는 적응제어 법칙은 다음과 같이 주어진다.

$$u_p = K_x x_m(t) + K_u u_m + K_e [y_m(t) - y_p(t)] \\ = [K_I + K_p] s(t), \quad (4)$$

여기서

$$s(t)^T = \{ [y_m(t) - y_p(t)]^T, y_m^T(t), y_p^T(t) \}$$

$$K_p(t) = [y_m(t) - y_p(t)] s^T(t) \Gamma \quad (5)$$

$$K_I(t) = -\mu K_I(t) + [y_m(t) - y_p(t)] s^T(t) \Omega,$$

이고  $\Omega, \Gamma$ 는 각각 양한정 정방행렬과 양의 반한정 정방행렬이다. 위의 식에서 보는 바와 같이 적응이득은 비례적분제어기와 같은 형태로 주어진다. Morse등[23]은 이와 같은 구조에 있어 적절한 안정도 특성이 어떻게 만족되는지를 보였고 또한, 비최소 위상 플랜트에 대해 적용될 수 있는 알맞음이 합체된 안정도 확장 루프의 구축에 대한 방법을 제시하였다. 그러나 그가 제시한 방법은 추종오차가 경계화된 경우에만 안정도가 보장된다는 단점이 있다.

### 2.2.4 의사 역모델링법

#### (PIM: Pseudo-Inverse Modelling Methods)

이 접근법에 있어서 이상검출 및 격리구조는 사용되지 않으며 특정한 고장모델이 가정된다. 재설정 제어에 있어 의사 역모델링법은 가능한 한 간결성을 유지하며, 재설정된 시스템은 공칭 시스템에 가깝게 근사화시키고 고장에 의해 수반되는 성능저하를 서서히 만드는 것이 목적이라 할 수 있겠다. 의사 역모델링법의 기본개념은 재설정된 시스템이 공칭 시스템을 근사화하도록 공칭 시스템의 상수되먹임 이득들을 수정한다는 것이다.

이 방법은 계산량이 적고 실현이 용이하다는 장점을 가지고 있다. 고장이 발생한 전후의 시스템간의 근접성의 척도 (Measure of closeness)는 각각의 경우의 폐로 시스템 행렬들간의 차이에 대한 Frobeniusnorm으로 알 수 있다. Gao등[16][17]은 위에서 언급한 Frobeniusnorm을 최소화함으로써 고장으로 인한 폐로 시스템의 고유값들의 변화에 대한 경계가 최소화됨을 보였다.

그러나, 의사 역모델링 접근법은 실제 응용에 있어서 다음과 같은 몇 가지 단점이 있다.

- 안정도 문제: 고장의 과급으로 인해 손상된 시스템의 안정도는 보장되지 않고 이로 인해 시스템에 바람직하지 못한 영향을 끼친다는 것이다.

이러한 안정도 문제를 극복하기 위해 Gao등[17]은 확장 의사 역모델링법(MPIM: Modified pseudo-inverse method)을 제시하였다. 이 기법은 시스템의 성능을 가능한 한 많이 회복하는 동시에 안정도 제약조건을 만족하면서 공칭 시스템과 고장으로 인해 손상된 시스템의 차이를 최소화하는 기법이다.

- 이상검출 및 격리에 있어서 건실성 문제: 의사 역모델링법은 고장의 식별, 검출 및 격리에 있어 명확한 건실특성들을 사용하지 않기 때문에 고장신호를 결정하는 감시시스템의 능력에 크게 의존한다. 불행히도, 이 문제는 제어뿐만 아니라 고장검출 및 격리에 있어 불확실성에 의해 결합된 매우 어려운 문제이다.
- 상태 되먹임에 있어서 제약: 의사 역모델링법은 재설정된 시스템이 상태되먹임 구조를 가져야 한다는 가정 하에서 그 동안 진행되어 왔으나 실제로 많은 응용분야에서 상태변수들은 유용하지 못하므로 플랜트를 안정화하기 위해서 출력되먹임 구조를 사용한다. 출력되먹임 구조는 안정도와 건실성을 성취하기 위한 자유도에 심각한 제한을 갖고 있으며 따라서 이 접근법 또한 제약을 갖게된다. 만약 상태추정 되먹임을 이용한 경우 설계된 관측기가 건실하지 못하면 루프전달회복 문제에 있어 곤란에 직면하게 된다.

### 2.2.5 혼합형 적응 LQ 제어기법

#### (Hybrid Adaptive Linear Quadratic Control)

Ahmed-Zaid등[1]은 비행제어 시스템설계에 있어 이상검출 및 격리과정을 이용하지 않는 혼합형 적응 LQ 제어기법을 제시하였다. 이 방법은 하드웨어 이상 등으로 인해 비행체의 동력학이 급격하게 변화할때 제어가 온라인 상에서 이상의 과급으로 인한 영향을 수용할 수 있는 능력을 가진다. 이들의 방법에서는 조정계수들을 줄이기 위해 축소차수 선형화모델이 사용되고 축소차수 선형화모델을 이용하여 적응제어시스템이 설계되며 전차수 비선형 모델에 대해 검증된다. 또한, 이 방법에서는 한켈노름(Hankel Norm) 모델축소 알고리즘을 사용하고 관심있는 주파수대에서 축소차수 선형화모델과 전차수 시스템모델이 일치 하는가를 주의 깊게 고찰한다. 비록 구동기 이상과 같이 이상으로 인해 제어입력이 제한된 경우에 대해서도 이 방법은 온라인 고장수용 능력을 가지고 있고 고장에 대한 명확한 정보가 필요하지 않는 장점을 가지고 있다.

### 2.3 여분 설계(Redundancy Design)

이상허용성을 이룩하기 위해서 시스템의 여분을 두는 것은 필수적이라 할 수 있다. 이 방법을 적용하기 앞서 여분의 타입, 여분의 수준, 그리고 특별한 상황에 대해 적절한 방법 인지등, 공정의 모든 여분의 특성과 위치가 결정되어야한다. 직접 여분이란 동일한 작업을 할 시스템 채널에 대해 다수



결 선택 스위치를 갖는 서로 독립적인 여러 개의 하드웨어 채널을 추가 설치하여 고장이 발생하더라도 적절한 스위칭을 통해서 고장에 관계없이 작업수행을 할 수 있도록 하는 것을 말한다. 비록 많은 경우에 있어서 직접 여분이 하드웨어의 사본을 이용해 구현될지라도 이상허용성 및 높은 보진성을 요하는 컴퓨터 시스템에 있어서는 소프트웨어와 하드웨어 견지에서 여분을 고찰해야 한다..

시스템이 정상적으로 동작할 때 여분의 사용에 따른 성능상의 이득은 없다. 이상허용제어에 있어 사용되는 여분은 시스템의 설계 및 구현하는데 비용의 증가를 초래함으로써 시스템은 많은 여분을 가질 수 없으며 주어진 한 도내에서 신뢰도를 극대화 할 수 있는 기법을 사용하여야 한다. 그러기 위해서는 시스템에서 발생할 수 있는 고장의 유형과 특성에 대한 세심한 고찰이 필요하며, 고장으로 인한 영향의 파급성과 빈도의 잠재력이 가장 큰 고장 및 결함을 목표로 집중적으로 여분을 설계함으로써 시스템의 신뢰도를 높이는 방법이 사용되어야 한다.

### 2.4 감시 시스템(Supervision System)

이상허용 제어시스템은 고장의 영향으로 인한 심각성을 결정하고 가장 적절한 제어함수를 선택하기 위해 감시기능을 위한 시스템이 필요하다. 이상허용제어에 대한 감시기능에 관한 연구는 다른 분야보다 훨씬 개발이 미진한 상태라 할 수 있다. 그러나 제어기의 재구조화 또는 온라인 재설정 및 진단 정보의 관리에 대해 퍼지 규칙 및 퍼지 제어기 선택 등과 같은 다양한 감시기법들이 개발되었다. 이들 연구에서는 다음과 같은 지능형 연산을 기반으로 한 광범위한 방법[14][43][55]들이 이용된다.

- 퍼지논리(Fuzzy Logic) : 부정밀성, 규칙기반 시스템과, 합리성의 근사화 처리를 위한 방법.
- 신경연산(Neuro Computing) : 시스템 식별, 학습 및 적용을 기반으로 하는 방법.
- 유전 알고리즘(Genetic Algorithm) : 계통화된 마구잡이 찾기와 최적화.
- 가설 합리화(Probabilistic Reasoning) : 결정분석과 불확실성의 관리.

이상허용제어의 개념하에서 이러한 강력한 지능연산 도구들을 통합하는 것은 시스템의 감시분야에 있어 새로운 연구 분야라고 할 수 있다.

## 3. 결 론

이상허용성은 시스템이 어떤 요소들의 고장으로 인해 파급된 오류 및 결함들의 축적으로 하부시스템에 고장이 발생한다고 해도 전체시스템의 주어진 기능 및 작업의 정상적인 수행을 보장할 수 있는 능력으로 정의되는데, 여러 열악한

환경 하에서도 연속적이고 신뢰성 있는 작업을 수행을 해야 하는 고신뢰도의 시스템에서는 이상허용기법의 필요성이 더욱 요구된다.

따라서, 이상허용제어 시스템은 조직적이고 통합성을 갖는 절차를 이용하여 매우 주의 깊게 설계되고 계획되어야 한다. 또한, 제어 및 진단에 관한 이론적 연구가 이상허용 제어시스템의 요구조건들에 대해서도 확장되어야 한다. 이러한 요구조건들을 확립하기 위한 도구로 각 요소들에 대한 고장가능성 분석, 고장 모드 및 파급효과 분석, 시스템 신뢰도 분석, 신뢰도 분배 그리고 여분시스템의 설계 등이 있다. 그리고 이상검출의 예기치 못한 영향과 제어기 재설정의 시간지연 등을 최소화하기 위해 이상검출 및 격리의 신속성에 대한 연구가 필요하다. 만약 제어기가 높은 통합성과 안정도, 성능 견실성을 갖지 못하면 이러한 시간지연으로 인해 시스템이 불안정해질 수 있기 때문이다. 이러한 이상허용기법은 시스템의 성능, 안정도 및 신뢰도에 시간이 치명적으로 영향을 미치는 실시간 시스템인 경우 그 중요성은 더욱 증가한다. 결론적으로 효과적인 이상검출 및 격리를 통해 각 요소의 고장을 검출하고 진단하여 그 영향으로부터 신속 정확하게 조치하는 이상허용방식은 응용시스템의 특성에 따라 다양하게 설계될 수 있으며, 이러한 이상허용기법에 대한 연구는 여러 산업분야에서의 응용시스템의 성능 및 신뢰도를 개선하는데 큰 공헌을 할 수 있을 것이다.

### 참고문헌

- [1] Ahmed-Zaid F, Ioannou P, Gousman K and Rooney R, "Accommodation of failures in the F-16 aircraft using adaptive control", IEEE Con. Sys. Mag., Vol. 11, No 1, pp. 73-78, 1991.
- [2] Antsaklis P. J. "On Autonomy and Intelligence in control", IEEE Con. Sys. Mag., Vol. 16, No. 3, pp. 61-62, 1995.
- [3] Arkin R. C. and Vachtsefanos G, "Qualitative fault propagation in complex systems", Proc. of CDC, Honolulu, pp. 1509-1510, 1990.
- [4] Åström K. J., "Tuning and Adaptation", 13th IFAC World Congress, San Francisco, 1996.
- [5] Åström K. J. and Wittenmark B., "Adaptive Control", Addison-Wesley, 2nd Edt., 1995.
- [6] Basseville M., "Detecting changes in signals and systems - A survey", Automatica, Vol. 24, No. 3, pp. 309-326, 1988.
- [7] Basseville M. and Nikiforov I. V., "Detection of abrupt changes: Theory and application", Prentice Hall, 1993.
- [8] Bennett S., Patton R. J. and Daley S., "Using bilinear motor model for sensor fault-tolerant rail traction drive", Proc. of IFACSAFEPROCESS, pp. 703-788, 1997.
- [9] Blanke M., Izadi-Zamanabadi R., Bogh S. A. and

- Lunau Z. P., "Fault-tolerant control systems - a holistic view", J. of Con. Eng. Prac., Vol. 5, No. 5, pp. 693-702, 1997.
- [10] Chen J. and Patton R. J., "Robust fault detection and isolation(FDI) systems", Contr. and Dyn. Sys., Mita Press, Vol. 74, pp. 171-223, 1996.
- [11] Doyle J. C., Glover K., Khargonekar P. P. and Francis B. A., "State space solutions to standard  $H_2$  and  $H_\infty$  control problems", IEEE Tr. Auto. Cont., Vol. 34, pp. 831-847, 1989.
- [12] Eich J. and Sattler B., "Fault-tolerant control system design using robust control techniques", Proc. of IFACSAFEPROCESS, pp. 1246-1251, 1997.
- [13] Eryurek E. and Upadhyaya B. R., "Fault-tolerant control and diagnostic for large scale systems", IEEE Con. Sys. Mag., Vol. 15, No. 5, pp. 34-42, 1995.
- [14] Frank P. M., "Application of fuzzy logic process supervision and fault diagnosis", Proc. of IFACSAFEPROCESS, pp. 597-612, 1994.
- [15] Frank P. M., "Advances in fault-tolerance by model based fault diagnosis", Proc. of ESF Workshop, COSY'95, 1995.
- [16] Gao Z. and Antsaklis P. J., "Pseudo-inverse method for reconfigurable control with guaranteed stability", 11th IFAC World Congress, Tallin, 1990.
- [17] Gao Z. and Antsaklis P. J., "Stability of the pseudo-inverse method for reconfigurable control system", Int. J. of Contr., Vol. 53, No. 3, pp. 717-729, 1991.
- [18] Gertler J. J., "Survey of model-based failure detection and isolation in complex plants", IEEE Con. Sys. Mag., Vol. 8, No. 6, pp. 3-11, 1991.
- [19] Horowitz I., "Survey of quantitative feedback theory", Int. J. of Contr., Vol. 53, pp. 255-291, 1991.
- [20] Horowitz I. Arnold P. B. and Houppis C. H., "YF-16-CCV Flight control system reconfiguration design using quantitative feedback theory", Proc. Nat. Aero. and Electr. Dayton, pp. 578-585, 1985.
- [21] Houppis C. H., Sating R. R., Rasmussen S. and Sheldon S., "Quantitative feedback theory technique and applications", Int. J. Contr., Vol. 59, No. 1, pp. 39-70, 1994.
- [22] Hunt J. E., Pugh D. R. and Price C. J., "Failure mode effects analysis - A practical application of functional modelling", App. Artif. Intel., Vol. 9, No. 1, pp. 33-44, 1995.
- [23] Huang C. Y. and Stengel R. F., "Restructurable control using proportional-integral implicit model-following", J. of Guid. Contr. and Dyn., Vol. 13, No. 2, pp. 303-309, 1990.
- [24] Isermann R. and Balle P., "Trends in the application of model based fault detection and diagnosis of technical processes", 13th IFAC World Congress, San. Francisco, Vol. N, pp. 1-12, 1996.
- [25] Izadi-Zamanabadi R. and Blanke M., "A ship propulsion systems as a benchmark for fault-tolerant control", Proc. of IFACSAFEPROCESS, pp. 1074 - 1082, 1997.
- [26] Jiang J., "Design of reconfigurable control systems using eigenstructure assignments", Int. J. of Contr., Vol. 59, No. 2, pp. 395, 1994.
- [27] Kaminer I., Pascoal A. M., Khargonekar P. P. and Coleman E. E., "A velocity algorithm for the implementation of gain-scheduled controllers", Automatica, Vol. 31, No. 8, pp. 1185-1192, 1995.
- [28] Keating M. S., Pachter M. and Houppis C. H., "QFT applied to fault-tolerant flight control system design", Proc. of ACC, Seattle, 1995.
- [29] Lane S. H. and Stengel R. F., "Flight control design using nonlinear inverse dynamics", Automatica, Vol. 24, No. 4, pp. 471-483, 1988.
- [30] Lawrence D. and Rugh W. J., "Gain scheduling dynamic linear controllers for nonlinear plant", Automatica, Vol. 31, No. 3, pp. 381, 1995.
- [31] Looze D. P., Weiss J. L., Eterno J. S. and Barrett N. M., "An automatic redesign approach for restructurable control systems", IEEE Con. Sys. Mag., Vol. 5, No. 2, pp. 16-22, 1985.
- [32] Mariton M., "Detection delays, false alarm rates and the reconfiguration of control systems", Int. J. of Con., Vol. 49, No. 3, pp. 981, 1989.
- [33] McFarlane D. C., "Robust controller design using normalised coprime factor plant description", PhD Thesis, Univ. of Cambridge, 1988.
- [34] Meyer G. and Hunt L., "Application of nonlinear transformations to automatic flight control", Automatica, Vol. 20, No. 1, pp. 103-107, 1984.
- [35] Morse W. D. and Ossman K. A., "Model-following reconfigurable flight control system for the AFTI/F-16", J. of Guid., Con. and Dyn., Vol. 13, No. 6, pp. 969-976, 1990.
- [36] Murad G. A., Postlethwaite I. and Gu D-W., "A robust design approach to integrated controls and diagnostics", 13th IFAC World Congress, San Francisco, Vol. N, 1996.
- [37] Napolitano M. R. and Swaim R. L., "New technique for aircraft flight control reconfiguration", J. of Guid., Con. and Dyn., Vol. 14, No. 1, pp. 184- 190, 1991.
- [38] Nett C. N., Jacobson C. A. and Miller A. T., "An integrated approach to controls and diagnostics: the 4

- parameter controller", Proc. of ACC, pp. 824-835, 1988.
- [39] Ochi Y. and Kanai k., "Design of restructurable flight control systems using feedback linearization", J. of Guid., Contr. and Dyn., Vol. 14, No. 5, pp. 903-911, 1991.
- [40] Ochi Y., "Application of feedback linearization method in a digital restructurable flight control system", J. of Guid., Contr. and Dyn., Vol. 16, No. 1, pp. 111-117, 1993.
- [41] Ostroff A., "Techniques for accommodating control effector failures on mildly statically unstable airplane", Proc. of ACC, pp. 906-913, 1985.
- [42] Patton R. J., Frank P. M. and Clark R., "Advances in fault diagnosis for dynamic systems", Springer-Verlag, 1997.
- [43] Rauch H. E., "Autonomous control reconfiguration", IEEE Con. Sys. Mag., Vol. 15, No. 6, pp. 37-48, 1995.
- [44] Rugh W. J., "Analytical framework for gain scheduling", IEEE Con. Sys. Mag., Vol. 11, pp. 79-84, 1991.
- [45] Shamma J. and Athans M., "Gain scheduling: Potential hazards and possile remedies", IEEE Con. Sys. Mag., Vol. 10, No. 3, pp. 101-107, 1992.
- [46] Smith G. A. and Meyer G., "Aircraft automatic flight control system with model inversion", J. Guid. Contr. and Dyn., Vol. 10, No. 3, pp. 269-275, 1987.
- [47] Son W. K. and Kwon O. K., "Fault-tolerant model-based predictive control with application to boiler systems", Proc. of IFAC SAFEPROCESS, pp. 1240-1245, 1997.
- [48] Stengel R. F., "Intelligent failure-tolerant control", IEEE Con. Sys. Mag., pp. 14-23, 1991.
- [49] Tyler J., "The characteristic of model-following systems as synthesised by optimal control", IEEE Tr. Aut. Con., Vol. 15, No. 3, pp. 326-333, 1970.
- [50] Tyler M. and Morari M., "Optimal and robust design of integrated control and diagnostic modules", Proc. of ACC, 1994.
- [51] Walker B. K., "Fault-tolerant control system reliability and performance prediction using semi-Markov models", Proc. of IFA CSAFPROCESS, pp. 1056-1067, 1997.
- [53] Williams S., and Hyde R. A., "A comparison of characteristic locus and  $H_\infty$  design methods for VSTOL flight control system design", Proc. of ACC'90, San Diego, pp. 2508-2513, 1990.
- [54] Wu N. E., "Feedback design in control reconfiguration systems", Int. J. of Rob. and Non-Lin. Con., Wiley, Vol. 6, pp. 561-570, 1996.
- [55] Zadeh L., "Fuzzy control: Issues, Contentions and Perspectives", 13th IFAC World Congress, San Francisco, 1996.
- [56] Zheng C., Patton R. J. and Chen J., "Robust fault-tolerant systems synthesis via LMI", Proc. of IFAC SAFEPROCESS, pp. 347-352, 1997.

## 저 자 소 개



**손원기(孫源奇)**

1969년 4월 23일생. 1995년 인하대 전기공학과 졸업. 동대학원 석사(1997). 1997 ~ 현재 인하대학교 전자·전기·컴퓨터공학부 박사과정. 관심분야는 적응제어, 제어 및 응용,로보틱스, 이상허용제어.



**권오규(權五圭)**

1953년 11월 14일생. 1978년 서울대 전기공학과 졸업. 동대학원 석사(1980), 동대학 박사(1985). 1988 ~ 1989년 호주 뉴카슬대 전기 전산 공학과 객원교수. 1982 ~ 현재 인하대학교 전자·전기·컴퓨터공학부 교수. 관심분야는 제어계측 이론 및 응용, 다변수 견실제어, 이상허용제어, 이상검출 및 진단.