

선형궤환제어계의 고장검출 및 보상시스템설계에 관한 연구

이 기 상 배 삼 목 박 의 성  
단국대학교 전기공학과

A Study on the Fault Detection and Accomodation  
in Linear feedback Control Systems

Kee Sang Lee Sang Wook Bae<sup>o</sup> Eui Sung Park

Department of Electrical Engineering  
Dankook University

ABSTRACT

The problem of process(Sensor) fault management in Observer Based Control System are considered and structures of Fault Tolerant Observer based Control Systems (FTOCS) that function well in the face of the faults are proposed.

The FTOCSs include detection logic unit and an additional observer driven by residuals of primary observer and estimate estimation errors of primary observer and fault variables.

Since the FTOCSs have the ability to detect and accomodate the the faults ,the original control objectives can be accomplished without considerable control performance deterioration even in the faulty environments. Therefore, the proposed FTOCSs can effectively be used for enhancing the functional reliability of the Observer Based Control Systems.

1. 서 론

상태궤환제어계를 설계할때의 중요한 가정은 모든 상태변수의 가용성이며, 이러한 가정은 모든 상태 변수를 측정하거나 또는 추정함으로써 해결 된다. 그러나 대부분의 경우에 후자를 택하고 있기 때문에 거의 모든 상태궤환제어계는 상태추정기를 포함하고 있으며, 이때의 계통입력은 상태추정기의 출력인 상태추정치인 선형결합으로 구성된다. 따라서 요구되는 입력의 정확한 발생을 위해서는 상태추정기가 정확해야 한다. 그러나 프로세스 자체의 고장 또는 센서의 고장이 발생한 경우에는 계통과 모델간의 불일치(Mismatch)로 인하여 매우 큰 추정오차가 발생할 수 있으며, 이 경우 추정치에 근거한 제어계의 성능은 크게 감퇴되어 결국 원래의 제어목적 달성을 할 수 없게 된다.

본 논문의 목적은 관측기를 포함한 상태궤환제어계

에서 계통과 모델간의 불일치(Mismatch)를 유발하는 요인인 프로세스고장 또는 센서고장을 검출하고, 또 고장량을 추정할 수 있는 프로세스(센서) 고장검출 및 보상계통을 설계하여 투입함으로써 고장 시에도 그것이 치명적인 고장이 아닌한 큰 성능 감퇴를 초래하지 않고 계통운용을 수행할 수 있는 제어계구조를 제안하고 그 유용성을 보이는데 있다.

제안된 고장검출 및 보상계통은 원래부터 제어계 구성에 포함되어 있는 상태추정기의 리시듀얼에 의해 구동되는 제 2의 상태추정기와 간단한 검출논리를 포함하고 있으며, 제 2의 상태 추정기는 고장으로 인한 제 1 상태추정기의 상태추정 편차 및 계통에 투입된 고장량을 추정하도록 설계되었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 상태관측기를 이용한 상태궤환제어계의 구조를 간단히 고찰하고, 3 장에서는 프로세스고장의 검출 및 보상계통을 설계했으며, 4 장에서는 센서고장의 검출 및 보상을 위한 제어계 구조를 제안했다. 마지막으로 5 장에서는 수치예를 들어 제안된 제어계의 성능을 보였다.

2. 상태관측기를 포함한 제어계의 구조

상태추정기를 포함한 제어계의 구성은 (그림.1)과 같고, 여기서 고려하는 프로세스의 모델은 식(1)로 표현된다.

$$\dot{x}(t) = A x(t) + B u(t) \tag{1.a}$$

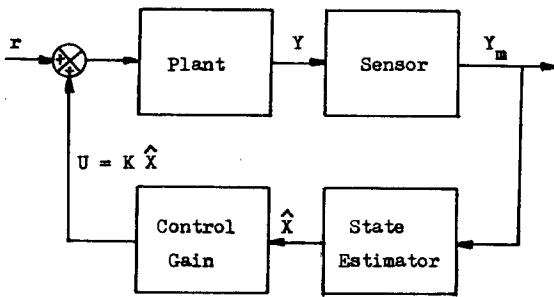
$$y(t) = C x(t) \tag{1.b}$$

여기서  $x \in R^n$ 는 상태벡터,  $u \in R^r$ 는 입력벡터,  $y \in R^p$ 는 출력벡터이며,  $A, B, C$ 는 각각  $(n, n)$ ,  $(n, r)$ ,  $(p, n)$  차원의 상수행렬이다. 그리고 계통방정식 (1)이 완전가관측하다는 가정하에 설계되는 상태추정기의 일반적 형태는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{X}}(t) &= (A-LC) \hat{X}(t) + L Y_m(t) + B U(t) \\ \hat{Y}(t) &= C \hat{X}(t) \end{aligned} \quad (2)$$

그리고 제어입력은 임의의 목적으로 설계된 상태관측한입력으로서 식(3)의 형태이다.

$$U(t) = K \hat{X}(t) \quad (3)$$



(그림. 1) 상태관측기에 근거한 제어계의 구조.

### 3. 프로세스고장에 대비한 제어계의 구성

#### (1) 프로세스고장의 영향

식(1)의 프로세스에서 프로세스고장은 외란, 파라미터변동, 구동기고장등이며 이를 고려한 방정식은 식(4)와 같다.

$$\dot{X}(t) = A X(t) + B U(t) + Q_p W_p(t) \quad (4.a)$$

$$Y(t) = C X(t) \quad (4.b)$$

위의 식에서  $W_p$ 는 미지의 고장을 나타내는  $q$  차원 벡터이며,  $Q_p$ 는 예상되는 고장의 투입경로를 나타내므로 결절 가능한  $(n, q)$ 차원의 상수행렬이다. 따라서  $W_p$ 발생시 상태추정기 (2)의 상태추정오차를 식(5)로 정의한다.

$$E_x = x - \hat{X} \quad (5)$$

그러면 식(4),(5)로부터 다음의 상태추정오차 방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{E}_x = (A-LC) E_x + Q_p W_p \quad (6.a)$$

$$E_y = C E_x = Y_m - \hat{Y} \quad (6.b)$$

그러면 식(6)으로부터 상태관측기를 포함하는 제어계에서는 프로세스고장의 발생시 크기가  $KE_x$  인 미지의 입력오차가 발생하게 되는 것을 알 수 있다. 그리고, 또 하나의 중요한 문제는 제어기 설계시 고장의 발생을 고려하지 않았기 때문에 고장자체 즉, 식(4)에서의  $Q_p W_p$ 가 처리되지 않는한 제어목적은 달성할 수 없다는 것이며, 그 처리를 위한 최선의 대책은  $W_p$ 를 추정하여 고장량이 허용치 이내이면 제어기 자체를 재구설하여 이를 보상하도록 하는 것이다.

#### (2) 프로세스고장의 검출

고장검출을 위해서 이용가능한 정보는 식(6.b)로 주어지는 제 1 상태관측기 식(2)의 추정오차이며, 이것이 임계치보다 큰 경우에는 일차적인 고장판단을 하고 고장의 종류 및 고장량을 구하는 동시에 추정오차  $E_x$ 를 추정해야 하며, 이는 식(6)에 대한 미지입력상태관측기를 구성함으로써 수행될 수 있다. 그리고  $W_p$ 의 추정을 위해서는 반드시 이에 대한 모델이 도입되어야 하며 고장변수에 대한 모델의 일반형은 다음과 같다.<sup>1,2)</sup>

$$\dot{Z}_i(t) = D_i Z_i(t) + E_i \delta(t) \quad (7.a)$$

$$W_i(t) = h_i Z_i(t) \quad (7.b)$$

여기서  $Z \in R^{m_i}$  이고,  $D_i, E_i, h_i$ 는 각각  $(m_i, m_i)$ ,  $(m_i, 1)$ ,  $(1, m_i)$ 차원의 상수행렬로서 고장의 파형 구조가 알려진 경우 다음과 같이 결정될 수 있다.

$$D_i = \begin{bmatrix} -a_{m_i} & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -a_{m_i-1} & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -a_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, E_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, h_i^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

그리고, 실험적 정보가 없는 경우에는  $a_i = 0$  ( $i=1, \dots, m$ ) 으로 선정하면 된다. 그러면  $W \in R^q$  인 고장벡터모델은 식(8)로 표현된다.

$$\dot{Z}(t) = D Z(t) + E \delta(t) \quad (8.a)$$

$$W(t) = H Z(t) \quad (8.b)$$

여기서  $Z \in R^q$  ( $M = \sum_{i=1}^q m_i$ ) 이며,  $D = \text{diag} [ D_1 ]$ ,  $E = \text{diag} [ E_1 ]$ ,  $H = \text{diag} [ h_1 ]$ , ( $i=1,2,\dots,q$ ) 이다. 이제 식(8)의 고장모형을 도입하여 식(6)의 오차계통을 다시 표현한 결과는 식(9)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_x \\ \dot{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A-LC & QpH \\ 0 & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ Z \end{bmatrix} \quad (9.a)$$

$$E_u = \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ Z \end{bmatrix} \quad (9.b)$$

식(9.b)의  $E_u$ 는  $Y_m - \hat{Y}$ 로서 측정가능한 것이므로 식(9)의

$$\text{pair} \left\{ \begin{bmatrix} A-LC & QpH \\ 0 & D \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix} \right\}$$

가 가관측이면 제 1 관측기의 상태추정오차  $E_x$ 를 추정하기 위한 다음의 상태관측기를 구성할 수 있다.<sup>2)</sup>

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{E}}_x \\ \dot{\hat{Z}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A-LC-M_1C & QpH \\ -M_2C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{E}_x \\ \hat{Z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{bmatrix} E_u \quad (10)$$

여기서  $M$ 는  $(n+m,p)$ 차원의 관측기 이득행렬이며 추정치  $E_x$ 는 고장발생여 기인한 제 1 관측기의 추정 오차이므로 재생되는 상태추정치  $X_{re}$ 는  $X_{re} = \hat{X} + \hat{E}_x$ 로 구해지며,  $\hat{W}_p = H \hat{Z}$ 는 고장량의 추정치이다. 고장의 분류 및 고장요소 판별은  $\hat{W}_p$ 의 분석에 의해 수행될 수 있으나, 여기서는 FAULT TOLERANT CONTROL SYSTEM설계에 그 목적이 있으므로 생략하기로 하였다.

[REM1] 추정가능한 고장요소의 수는 일반적으로  $q \leq p$ 개이다.

[REM2] 고장검출에만 관심이 있는 경우에는  $W_p$ 를 모델링하지 않은 상태에서 식(6)에 대한 고장검출필터(DF: DETECTION FILTER)를 구성한다.<sup>4,5)</sup> 이 DF는  $W_p$ 의 영향이  $E_x$ 의 특정부분에만 나타나도록 필터이득을 결정함으로써 구성되며, 이때 고장검출에 사용될 수 있는 정보  $\hat{E}_x$ 는 원래계통에 대해 구성된 DF의 가용정보인  $E_u$ 보다 큰 차원의 벡터이므로 더욱 명백한 고장 분류를 가능하게 한다.

### (3) 프로세스고장의 보상을 위한 제어계구조

전술한 바와 같이 제한된 프로세스고장검출 계통은 재생된 상태추정치  $X_{re}$ 와 고장량  $\hat{W}_p$ 를 제공하므로  $\hat{W}_p$ 의 분석결과 Tolerable한 고장으로 판단되는 경우(치명적인 경우 OPERATOR에 의존) 및 계속적인 계통운용이 불가피한 경우(운행중인 자동비행계)에는 이들 정보를 이용하여 고장발생에도 불구하고 양호한 제어성능을 갖는 제어계의 설계가 가능하며 그 구조를(그림.2)에 보았다. 제한된 제어계에서 제 2 관측기는  $|E_u|$ 의 임계치 검사에 따라  $|E_u| > Th$  일 경우에만 동작하며 정상동작시에는  $X_{re} = \hat{X}$ 로 되어 PRIMARY CONTROLLER만 구동되므로(그림.1)의 구조와 같으며  $|E_u| > Th$  일때에는 제 2 관측기의 정보에 근거하는 보상동작을 수행한다. 이 경우 보상입력을 투입한 식(4)의 계통방정식은 다음과 같다.

$$\dot{X} = A X + B(U_p + U_d) + QpW_p \quad (11)$$

따라서  $B U_d = -QpW_p$ , 즉  $U_d = -B^{-1} QpW_p$ 로 선정함으로써 고장의 영향을 제거할 수 있고,  $U_p = K X_{re}$ 로서 원래의 제어목적을 달성할 수 있다.<sup>2)</sup>

[REM3] 제 2 관측기는 추정오차계통에 대해 설계된 것이므로 초기조건에 불일치에 의한 영향이 매우 작을뿐 아니라, 과도상태에서의 제 1 관측기의 추정오차가 큰 경우 이를 추정하여 보정하는 효과를 갖는다.

## 4. 센서고장에 대비한 제어계구상

### (1) 센서고장의 영향

계통(1)에서 센서고장의 발생을 고려할때 계통방정식은 다음으로 표현될 수 있다.

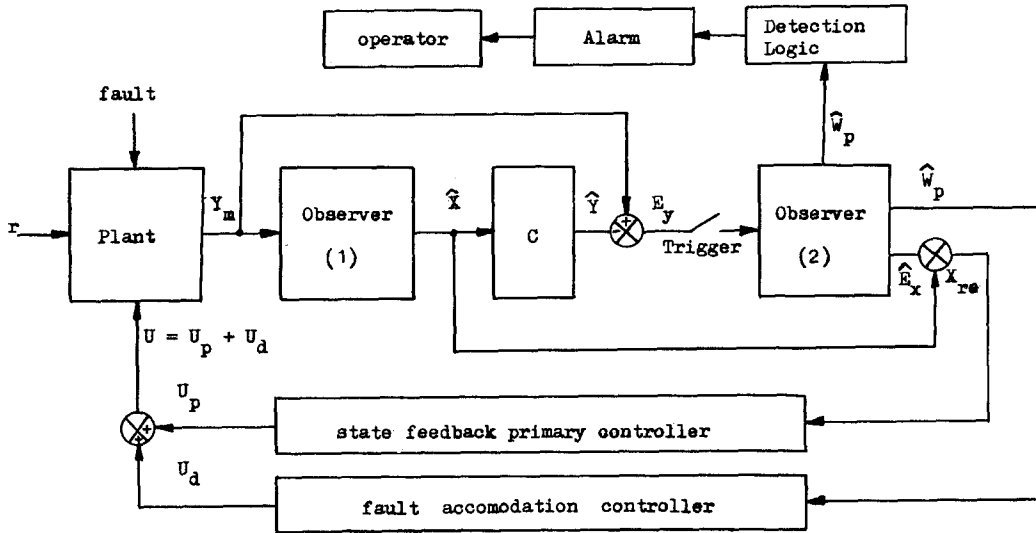
$$\dot{X}(t) = A Y(t) + B U(t) \quad (12.a)$$

$$Y_m(t) = C X(t) + QeW_s(t) \quad (12.b)$$

그러면 센서고장  $QeW_s(t)$ 로 인한 상태관측기(2)의 추정오차방정식은 식(13)으로 구해진다.

$$\dot{E}_x(t) = (A-LC) E_x(t) - L QeW_s(t) \quad (13.a)$$

$$E_u(t) = C E_u(t) + QeW_s(t) = Y_m - \hat{Y} \quad (13.b)$$



(그림.2) 프로세스고장에 대비한 제어계의 구조.

그러므로 이 경우에도 센서고장으로 인해 크기가  $KEx$ 인 미지 입력오차가 발생함을 알 수 있다. 따라서 센서고장이 발생했을 때에도 제어 목적을 달성하기 위해서는  $Ex$ 를 추정하여 입력오차를 보상해 주어야 하고, 그 보상방법을 (2)절에서 기술한다.

### (2) 센서고장검출 및 보상제어계의 구성

프로세스고장의 경우와 마찬가지로 고장벡터모델 (8)을 도입한 경우 오차발정식은 다음으로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{E}x \\ \dot{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A-LC & -LQ_0H \\ 0 & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ex \\ Z \end{bmatrix} \quad (14.a)$$

$$E_u = \begin{bmatrix} C & Q_0H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ex \\ Z \end{bmatrix} \quad (14.b)$$

위의 계통에서  $E_u$ 는 측정가능하므로 식(14)가 완전가관측하다면  $Ex$  및  $W_e$ 를 추정하기 위한 상태관측기를 아래와 같이 구성할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{E}x} \\ \dot{\hat{Z}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A-LC-M_1C & -M_1Q_0H \\ -M_2C & D-M_2Q_0H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{E}x \\ \hat{Z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{bmatrix} E_u \quad (15)$$

위에서  $\hat{E}x$ 는 센서고장에 의한 제 1 상태관측기의 추정오차  $Ex$ 의 추정치이며  $\hat{W}_e = H\hat{Z}$ 는 센서 고장량의 추정치이다. 따라서 식(15)의 관측기가 적절히 설계되었을 경우  $K\hat{E}x$ 에 의해 입력보상을 할 수 있고

$\hat{W}_e$ 를 고찰함으로써 상세한 고장분석이 가능하다.

그러므로 센서고장에 대비한 제어계는  $E_u$ 에 의해 고장판단을 하고 고장판단이 내려지면 제 2 상태관측기 (15)에 의해 추정오차  $Ex$  및  $W_e$ 를 추정하고 이를 상태제한 제어계로 투입하여  $X_{re}$ 를 구할 수 있도록 구성하며 전체 고장검출 및 보상계통의 구조를 (그림.3)에 나타내었다.

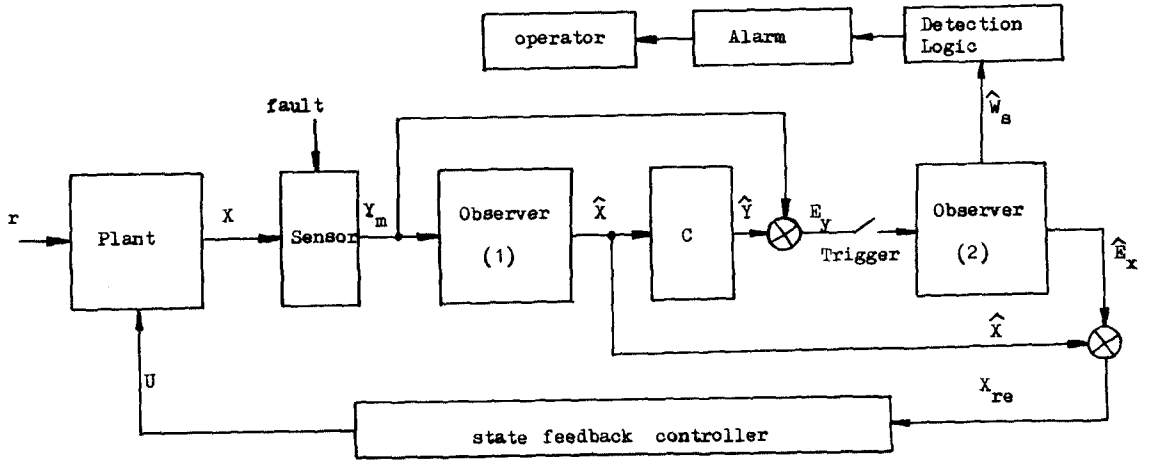
위의 구성에서  $|E_u| < Th$ 인 경우에는  $X_{re} = \hat{X}$ 로 되며 보상 및 검출을 위한 제 2 상태관측기는 동작하지 않으므로 (그림.1)의 구조가 되며,  $|E_u| > Th$ 이면 제 2 관측기가 동작하여 보상을 수행하므로 센서고장시 여도 큰 성능저하 없이 상태제한제어가 가능하다.

### 5. 수치예 및 simulation 결과검토

본 연구에서 제안된 고장검출 및 보상계통을 포함하는 OBSERVER BASED CONTROL SYSTEM의 성능을 검토하기 위하여 식(6.1)로 표현되는 선형시불변 계통을 고려한다.

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= \begin{bmatrix} -2.5 & -2.5 & -2 \\ 0.5 & -5.5 & -2 \\ 2 & 0 & -1 \end{bmatrix} X(t) + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} U(t) \\ Y(t) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} X(t) \end{aligned} \quad (6.1)$$

고장을 고려하지 않은 상태에서 제어계의



(그림.3) 센서고장에 대비한 제어계의 구조.

구성요소인 상태관측기는 식(e.2)로, 그리고 상태관측제어기는 Regulator로 동작하도록 설계되었으며 궤환이득은 (e.3)과 같다.

$$\dot{\hat{X}}(t) = \begin{bmatrix} -4.6 & -4.6 & -2 \\ -1.9 & -7.9 & -2 \\ 6.1 & 4.1 & -1 \end{bmatrix} \hat{X}(t) + \begin{bmatrix} 2.1 & 2.1 \\ 2.4 & 2.4 \\ -4.1 & -4.1 \end{bmatrix} Y(t) + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} U(t) \quad (e.2)$$

$$K = \begin{bmatrix} 2.1226 & -1.8218 & 0.3218 \\ 2.1226 & -1.8218 & 0.3218 \end{bmatrix} \quad (e.3)$$

그리고 Fault Tolerant Control System의 구성과 Simulation은 프로세스고장의 경우 및 센서고장의 경우 각각에 대해 수행되었으며, 각 경우에 대한 보상시와 비보상시의 특성비교를 (그림.4), (그림.5)에 보였다.

(그림.4)는 프로세스고장 발생시 응답특성으로서 가정된 고장은 i)  $0 \leq t \leq 0.5$  에서 크기 0.5의 Pulse Type Fault 및 ii)  $t \geq 4$  에서 크기 0.2의 Bias Fault 이다.

Simulation결과를 토대로 보상,비보상시의 특성을 비교한 결과는 다음과 같다. i) Pulse Type Fault 발생시에도 궤환계가 안정하므로 두 경우 모두 원래의 상태로 복귀하나 그 Regulation특성은 보상계가 우월하다. ii) Bias fault 발생시 비보상계는 Regulator로서 동작하지 못하는 반면 보상계는 고장발생후 약1.5초 이내에 원래상태로

복귀하는 성능을 갖는다.

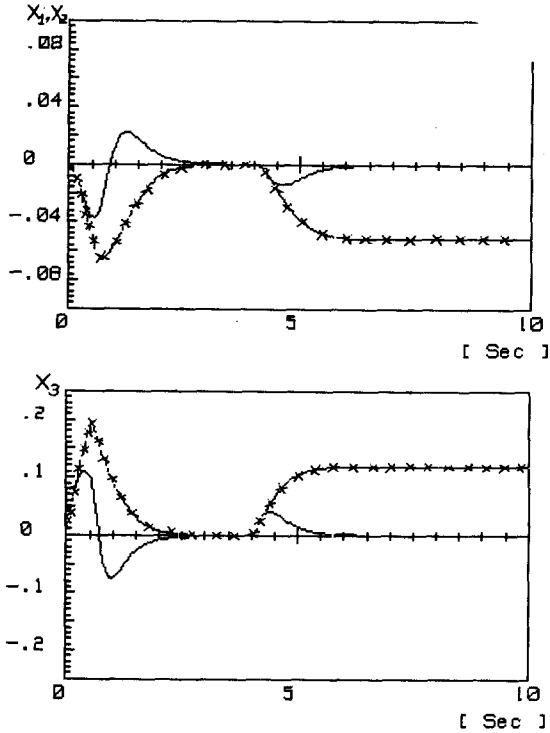
(그림.5)는 센서 고장시 특성비교로서 (a) 계통에 투입되는 외란이 Sensor Fault Decion System에 미치는 악영향의 정도와 (b) 센서고장발생시 미의 처리능력을 보인것으로 그 분석결과는 다음과 같다. i) 일반적으로 외란이 센서고장 검출시스템에 미치는 악영향은 대단히 크며, 이로 인해 계통성능의 감퇴가 초래될 수 있다. 그러나 본 연구에서 제안된 고장 검출 및 보상계통은 이 악영향을 최소화 하도록 설계될 수 있으며  $0 \leq t \leq 3$  초까지의 특성에서 나타난 바와 같이 센서고장검출 및 보상계통의 추가에 의한 Regulation특성의 감퇴는 매우 적다. ii) 센서의 Bias고장 발생시 비보상계의 상태추정값은 Bias된 정상상태값으로 수렴하나 보상계는 이 고장에 의한 제 1 상태관측기의 추정오차를 보정하여 고장으로 인한 계통특성의 감퇴를 초래하지 않는다.

## 6. 결론

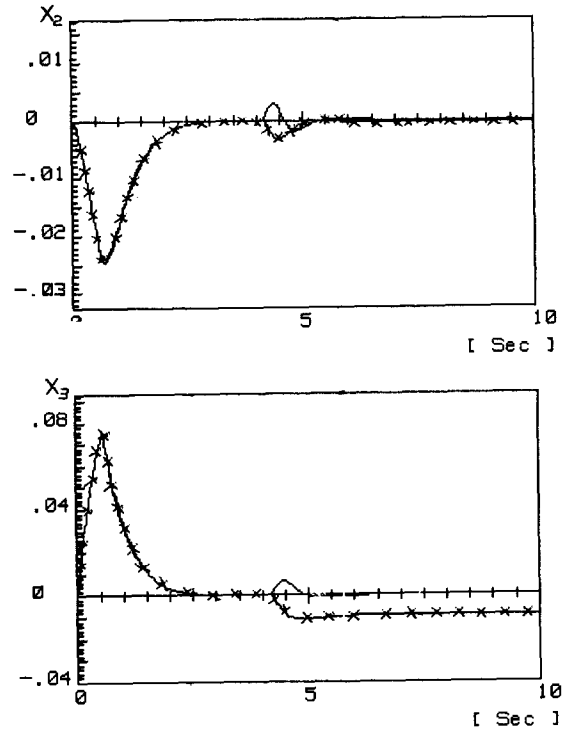
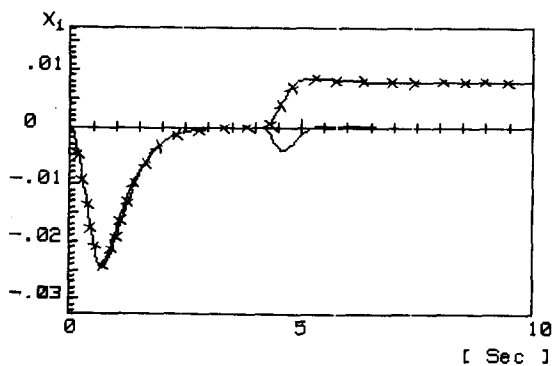
상태관측기를 포함한 제어계의 신뢰도를 향상시키기 위한 대책으로서 프로세스 ( 센서 ) 고장을 검출하고, 고장으로 인한 관측기오차를 추정할 뿐아니라 고장량 자체를 추정할 수 있는 고장검출방법을 보이고 이를 이용한 Fault TOLERANT OBSERVER BASED CONTROL SYSTEM을 구성했다.

제안된 고장보상제어기는 프로세스( 센서 )

고장에도 불구하고 거의 정상적인 제어성능을 유지하며 원래의 제어 목적을 수행할 수 있다. 따라서 고신뢰도가 요구되는 계통의 제어계 구조로서 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.



(그림.4) 프로세스고장의 발생시 고장보상계통을 포함한 제어계와 비보상제어계의 특성비교.  
[ ---- ] : 보상계 , [ - - - ] : 비보상계.



(그림.5) 센서고장의 발생시 고장보상계통을 포함한 제어계와 비보상제어계의 특성비교.  
[ ---- ] : 보상계 , [ - - - ] : 비보상계.

#### 참고 문헌

1. K.S.Lee and S.W.Bae, "A Process Fault Detection Filter Design by Fault Vector Modelling Approach and an Application", TKIEE, Vol.36, No.6, pp.430-436, 1987.6.
2. C.D.Johnson, "Theory of Disturbance Accommodating Controllers", Control and Dynamic Systems, Vol.12, pp.389-489, 1976.
3. J.O'Reilly, "Observers for Linear Systems", Academic Press, 1983.
4. A.S.Willeky, "A Survey of Design Methods for Failure Detection in Dynamic Systems", Automat. Vol.12, pp.601-611, 1976.
5. J.E.White and J.L.Speyer, "Detection Filter Design: Spectral Theory and Algorithms", Proceedings of ACC., pp.1475-1481, 1986.6.