

비례적분(PI) 관측기를 이용한 시스템의 고장진단 Fault Detection and Isolation of System by using PI observer

김 환성*, 김 상봉**

Hwan Seong Kim* and Sang Bong Kim**

*부산수산대학 기계공학과, **부산수산대학 기계공학과 부교수
Tel : (051) 620-6457, email : memcl@sun630cc.nfup.ac.kr

ABSTRACT

The robustness issues in fault detection and isolation(FDI) have received considerable attenuation in recent years, due to the increasing demand for safe and reliable operation of uncertain and complex dynamic systems. The aim of this paper is to present the FDI method by using proportional integral(PI) observer and unknown input observer(UIO) under the faults of actuators and sensors. Due to this simple residual generator, the PI observer can easily detect the both faults of actuator and sensor. A simulation results show the effectiveness of this methods.

Key Words : Proportional Integral Observer(비례적분 관측기), Unknown Input Observer(미지입력 관측기), Fault Detection and Isolation(고장진단 및 분리), Actuator Fault(액츄에이터고장), Sensor Fault(센서고장), Step disturbance(스텝 외란)

1. 서론

시스템의 고장 진단은 기차의 차륜을 해머로 두들겨 반사되는 음파로서 진단을 행하는 등 인간의 지식 및 경험에 의한 것이 주이었으나, 점차 시스템이 복잡화, 대규모화, 자동화 등이 진보됨에 따라 자동제어이론과 더불어 새로운 한 분야로서 정착되기에 이르렀다¹⁻²⁾. 시스템의 진단기술은 설비의 이상 및 고장을 자동적으로 감지하기 위한 기술로 정의되어 시스템의 상태를 파악하여 현재의 이상 또는 미래의 고장을 예측하는 소프트웨어 및 하드웨어기술이라 할 수 있다. 1960년대 미국의 軍, NASA 등에서는 진동 및 음파를 이용한 방법으로 기계의 고장진단 및 검출법으로서 Signature analysis에 대한 연구, 영국에서는 齒車축의 진단기술에 대한 연구등 유럽을 바탕으로 성황리 연구가 이루어졌다.

근년, 생산현장에서는 안전점검을 정기적으로 행하는 고장예방법으로 부터 설비의 이상유무를 감지하여 필요시 점검·수리를 행하는 고장豫知로 발전하고 있으며, 고장豫知를 실시하기 위해서는 생산설비를 항상 감시하고 이상을 감지하는 온라인의 진단설비기술이 필요로 하고 있다. 또한, 원자력 발전소 등 우주항공분야등 위험을 동반하는 장소 및 인간이 들어갈 수 없는 장소 등의 안전성을 확보하기 위하여 고장진단 시스템이 요구되고 있으며, 그 외에 높은 신뢰성이 요구되는 분야에 대해서는 중요한 과제로 되고 있다.

이러한 배경과 더불어 고장진단기법의 하나로서 관측기를 이용한 방법이 널리 연구되기에 이르렀다^{3,4)}. 관측기를 이용한 방법은 설계가 비교적 용이하여 적용분야가 넓고, 계산기상에서 프로그래밍에 의해 실현이 가능하므로 온라인으로 시스템의 고장진단에 적용할 수 있는 등 많은 이점을 가지고 있다.

그러나, 관측기를 이용하는 고장진단은 대상모델에 대한 정확한 수학 모델이 구해지는 것을 전제로 하고 있으므로, 파라미터의 부정확성, 모델의 선형화에 따른 모델링오차, 모델화되지 않은 비선형성, 노이즈 및 외란에 의해 오진단이 일어나기 쉽다. 따라서, 관측기를 이용한 고장진단을 실현하기 위해

서는 기본적으로 모델화오차에 대해서 로바스트성을 지니는 관측기의 구성이 요구된다.

본 논문에서는 로바스트 관측기의 일종인 적분기를 지닌 비례적분(PI) 관측기에 의한 고장진단을 행하도록 한다. PI 관측기는 Wojciechowski⁵⁾에 의해 파라미터 변동에 대해서 로바스트한 관측기로 처음 제안된 이래, 다변수 시스템에 대한 로바스트성이 검증되어 실제 시스템에 적용 가능성을 보였다⁶⁻⁸⁾.

본 논문에서는 PI 관측기의 장점인 스텝외란의 추정 및 소거기능을 이용하여 스텝상의 액츄에이터 고장인 경우 완전 검출 및 분리가 가능함을 보인다. 센서 고장이 발생하는 경우 미지입력 관측기와와의 조합으로 인해 고장검출 및 분리가 가능한 방법을 제안하며, 액츄에이터 및 센서의 동시 고장의 경우에도 적용할 수 있음을 보인다. 따라서 본 논문의 PI 관측기를 이용한 고장진단법은 종래법¹²⁻¹³⁾에 비해 적은 관측기 구성으로 가능하며, 고장대상 시스템이 폭 넓은 장점 및 액츄에이터와 센서의 고장진단이 가능하다.

2. 시스템과 관측기

다음의 n 차원 선형 시불변 시스템을 고려한다.

$$\Sigma : \begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Nd(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases}$$

여기서, $x(t) \in R^n$ 은 상태벡터, $y(t) \in R^p$ 는 출력벡터, $u(t) \in R^m$ 은 입력벡터, $d(t) \in R^r$ 는 외란벡터로 한다. 관측기는 시스템의 입력신호 $u(t)$ 와 출력신호 $y(t)$ 로부터 시스템의 상태를 추정하는 기구이다. 여기서, 시스템의 상태변수 $x(t)$ 를 추정하기 위해 $n+r$ 차원 PI 관측기와 입력 $u(t)$ 가 미지인 경우도 상태 추정이 가능한 미지입력 관측기(UIO)에 대해서 고려하자.

2.1 PI 관측기

PI 관측기는 다음과 같이 주어진다^[6].

$$\Sigma_{PI} : \begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = (A - L_p C)\hat{x}(t) + L_p y(t) + Bu(t) + Nw(t) \\ \hat{w}(t) = L_I(y(t) - C\hat{x}(t)) \end{cases}$$

여기서, $\hat{x}(t) \in R^n$ 는 추정된 상태벡터이며, L_p, L_I 는 각각 비례, 적분 게인이다. 시스템 Σ 에 대해 시스템 Σ_{PI} 가 PI 관측기로 될 필요충분조건은

$$Re \lambda_i \begin{bmatrix} A - L_p C & N \\ -L_I C & 0 \end{bmatrix} < 0, \quad i=1, \dots, n+r \quad (1)$$

이며, $\lambda \in \#$ 은 #의 고유치를 나타내고 있다. 또한, 윗식을 만족하기 위해서는

$$\text{pair} \left(\begin{bmatrix} A & N \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix} \right) \text{ is observable.} \quad (2)$$

의 조건은 만족되어야 하며, 이 조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{rank} \begin{bmatrix} A & N \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = n+r \quad (\text{if } r=p) \quad (3)$$

$$\text{rank} \begin{bmatrix} A & N \\ GC & 0 \end{bmatrix} = n+r \quad (\text{if } r \neq p) \quad (4)$$

여기서, G 는 임의의 행렬이다.

본 PI 관측기의 장점에 대해서는 4.1장에서 다루기로 한다. 한편, Beale 등^[7]에 의해 $n+b$ 차원 PI 관측기가 제안되어져 본 PI 관측기 보다 설계의 유연성을 지니고 있기 때문에 체계적인 설계가 문제로 남았으나, 최근 Kawaji 등^[8]에 의해 새로운 설계법이 제안되었다.

2.2 미지입력 관측기(UIO)

시스템 Σ 에서 $d(t)$ 는 다양한 종류의 외란으로 가정할 수 있다. 실제 시스템에서 이와 같은 외란을 미지입력으로 간주할 수 있으므로, 이러한 미지입력의 존재 하에서도 상태를 추정할 수 있는 미지입력 관측기를 다루고자 한다.

다음의 Luenberger 형 관측기를 고려한다.

$$\Sigma_{Luen} : \begin{cases} \dot{z}(t) = \hat{A}z(t) + \hat{B}y(t) + \hat{f}u(t) \\ \hat{x}(t) = \hat{C}z(t) + \hat{D}y(t) \end{cases}$$

시스템 Σ 에 대해 시스템 Σ_{Luen} 이 미지입력 관측기로 될 충분 조건은 다음의 정리와 같다.

[정리2.1]^[9] 시스템 Σ 에 대해 시스템 Σ_{Luen} 이 미지입력 $d(t)$ 에 대해 관측기로 될 충분조건은

$$Re \lambda_i [\hat{A}] < 0, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

이며 다음을 만족하는 행렬 $U \in R^{n \times n}$ 가 존재하여야 한다.

$$\hat{A}U + \hat{B}C = UA \quad (6)$$

$$J = UB \quad (7)$$

$$UN = 0 \quad (8)$$

$$\hat{C}U + \hat{D}C = I_n \quad (9)$$

덧붙여, 문헌[9]에서 Descriptor 시스템에 대한 미지입력 관측기 설계를 다루고 있으므로 관심 있는 독자는 참고하기 바란다.

정리 2.1의 존재조건은 다음과 같다.

[정리2.2]^[10] 시스템 Σ 에 대해 시스템 Σ_{Luen} 이 미지입력 $d(t)$ 에 대해 관측기로 될 충분조건은

$$(i) \text{rank } CN = \text{rank } N = r \quad (p \geq r) \quad (10)$$

$$(ii) \text{rank} \begin{bmatrix} A - sI & N \\ C & 0 \end{bmatrix} = n+r, \quad \forall s \in \mathbb{C}, Re(s) \geq 0 \quad (11)$$

이다.

여기서, 미지입력 관측기 Σ_{Luen} 의 파라미터는 다음과 같이 구해진다.

$$\hat{D} = N(CN)^+ + Z(I_p - CN(CN)^+) \quad (12)$$

$$\hat{A} = (I_n - \hat{D}C)A - K C \quad (13)$$

$$\hat{B} = K(I_p - C\hat{D}) + (I_n - \hat{D}C)A\hat{D} \quad (14)$$

$$U = I_n - \hat{D}C \quad (15)$$

$$J = UB \quad (16)$$

여기서, Z 는 임의의 행렬이며 윗첨자 +는 의사역행렬을 나타낸다.

3. 관측기를 이용한 고장진단의 개념

고장진단을 대상으로 하는 시스템을 선형시불변시스템 Σ 로 가정한다. 관측기에 의해 구해진 상태 추정치 $\hat{x}(t)$ 는 관측기의 성질에 의해 일정시간내에 시스템의 상태 $x(t)$ 와 일치된다. 여기서 상태오차를 잔사 $r(t)$ 로하며, 다음과 같이 정의하자.

$$r(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (17)$$

시스템에 이상이 없을 경우는 $r(t)=0$ 로 되지만, 시스템에 이상이 발생할 경우, 관측기는 시스템의 상태를 올바르게 추정할 수 없으므로 $r(t) \neq 0$ 가 된다. 따라서 잔사 $r(t)$ 에 의해 시스템의 이상을 다음과 같이 측정 가능하다.

$$r(t) = 0 : \text{no fault} \quad (18)$$

$$r(t) \neq 0 : \text{fault} \quad (19)$$

즉, 잔사 $r(t)$ 는 시스템의 이상이 발생한 시간 및 개소의 정보를 지니고 있으므로 잔사로부터 고장진단이 가능하다. 고장진단을 실현하기 위해서는 잔사의 발생 및 잔사의 평가의 단계가 필요하다. 잔사의 발생에 의해 고장검출이 행하여지며, 잔사의 평가에 의해 고장인지 아닌지를 판단하며, 고장이라면 고장의 종류 및 개소를 밝혀 내야 한다.

잔사의 평가함수를 $J(r(t))$ 라하면 고장의 검출을 위해서는 다음의 조건이 만족해야 한다.

$$J(r(t)) \leq J_{th} \quad \text{for } f(t)=0 \quad (20)$$

$$J(r(t)) > J_{th} \quad \text{for } f(t) \neq 0 \quad (21)$$

여기서, $f(t)$ 는 고장함수를 나타내며, J_{th} 는 시스템의 특성을 고려한 적당한 정수이다. $J(r(t))$ 는 이상이 발생하지 않는 경우, 잔사 $r(t)=0$ 의 이상적인 상태에서 $J(r(t))=0$ 로 되지만, 실제에서는 모델화 오차 및 외란등의 영향에 의해 이상이 발생하지 않더라도 $r(t) \neq 0$ 로 되는 경우가 있으며, 이러한 경우의 오진단을 방지하기 위해 적당한 J_{th} 를 설정할 필요가 있다. 또한, 고장의 종류를 특정지우기 위해서는 다음의 조건이 만족되어야 한다.

$$J(r_i(t)) \leq J_{thi} \quad \text{for } f_i(t)=0 \quad (22)$$

$$J(r_i(t)) > J_{thi} \quad \text{for } f_i(t) \neq 0 \quad (23)$$

여기서, $f_i(t) (i=1, \dots, q)$ 는 i 종류의 고장의 함수이며, $r_i(t)$ 와 J_{thi} 를 각각 고장 i 에 대한 잔사와 적당한 정수로 한다. 이 경우에도 모든 고장이 완전히 분리된다는 이상적인 가정하에 $J_{thi}=0$ 을 만족하면 좋지만, 실제 시스템에서 모든 고장이 완전히 분리될 수 없으므로 적당한 J_{thi} 를 설정해야만 한다.

4. 고장검출 및 분리

고장검출 및 분리의 방법에 대해서는 DOS(Dedicated Observer Scheme)^[10] 및 GOS(Generalized Observer Scheme)^[11] 등이 제안되었고, 최근 미지입력 관측기에 의한 방법이 Hou 등^[12]에 의해 제안되어 널리 이용되고 있다. 그러나, 미지입력 관측기는 시스템의 파라미터 변동에 대해서 취약하므로, 실제 시스템에서는 유용하다고 볼 수 없다.

시스템 Σ 에서 외란 $d(t)$ 를 액츄에이터 고장함수로 간주하고, 센서 고장함수 $s(t)$ 를 고려하면 다음과 같이 구성될 수 있다.

$$\Sigma: \begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Nd(t) \\ y(t) = Cx(t) + s(t) \end{cases}$$

먼저, PI 관측기의 특성을 알아보기로 한다.

4.1 PI 관측기를 이용한 액츄에이터의 고장진단

고장진단의 대상 시스템인 Σ 에서 $s(t)=0$, 즉 센서의 고장은 없다고 하고 액츄에이터의 고장을 스텝형으로 가정하자. 또한 모든 액츄에이터의 고장진단을 위해 $N=B$ 로 하자.

여기서, 오차벡터를

$$e_x(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (24)$$

으로 정의하자. 오차벡터의 미분치는

$$\begin{aligned} \dot{e}_x(t) &= \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t) \\ &= (A - L_p C)e_x(t) + Nd(t) - N\omega(t) \end{aligned} \quad (25)$$

으로 되며, $\zeta(t)$ 를

$$\zeta(t) = d(t) - \omega(t) \quad (26)$$

으로 정의하면 (25)식은 다음과 같이 된다.

$$\dot{e}_x(t) = (A - L_p C)e_x(t) + N\zeta(t) \quad (27)$$

시스템 Σ_{PI} 에서 $\dot{\omega}(t)$ 를 (26)식의 미분치에 대입하면

$$\begin{aligned} \dot{\zeta}(t) &= \dot{d}(t) - \dot{\omega}(t) \\ &= -L_i C e_x(t) \end{aligned} \quad (28)$$

으로 된다. 단, $d(t)$ 는 스텝형으로 가정하였으므로 $\dot{d}(t)=0$ 이다. 여기서, (27)와 (28)식으로 확대계를 구성하면

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_x(t) \\ \dot{\zeta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A - L_p C & N \\ -L_i C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_x(t) \\ \zeta(t) \end{bmatrix}$$

으로 되며, PI 관측기의 필요충분조건 (1)식에 의해 $e_x(t)$,

$\zeta(t) \rightarrow 0 (t \rightarrow \infty)$ 임을 알 수 있다. 따라서, (26)식에 의해

$$\omega(t) = d(t) \quad (29)$$

로 되어 PI 관측기를 이용하여 액츄에이터의 고장을 추정할 수 있다.

4.2 미지입력 관측기에 의한 액츄에이터의 고장진단

시스템 Σ 에서 센서고장이 없다고 가정하면 시스템은 다음과 같이 표현된다.

$$\Sigma: \begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + N_i d(t) + \bar{N}d(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (i=1, \dots, m)$$

여기서, N_i 는 진단하고자 하는 1개의 액츄에이터이며 \bar{N} 은 그 이외의 액츄에이터를 나타낸다.

시스템 Σ 에서 \bar{N} 에 대해 미지입력 관측기를 구성하면 \bar{N} 입력되는 모든 액츄에이터의 고장함수 $d(t)$ 는 관측기의 상태 변수에 영향을 미치지 못하며, 진단하고자 하는 N_i 에 대해서는 고장함수가 영향을 미치므로, 이로 인하여 관측기의 상태변수는 실제 출력치와 오차를 가지게 된다. 관측기 출력오차를

$$e_y(t) = y(t) - \hat{y}(t) = y(t) - C\hat{x}(t) \neq 0$$

으로 정의하며, 이 출력오차가 발생하는 것으로부터 i 번째 액츄에이터에 고장이 발생함을 알 수 있다. 그러나, m 개의 다른 액츄에이터의 고장을 파악하기 위해서는 m 개의 미지입력 관측기의 구성이 필요하며, 이때 고장진단 시스템은 다음과 같이 구성된다.

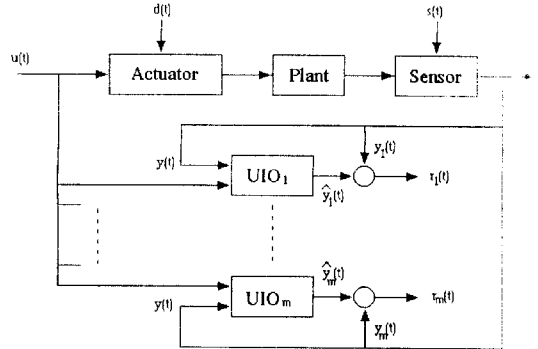


Fig. 1 A fault diagnosis scheme using unknown input observers (UIOs)

위의 미지입력 관측기를 바탕으로 한 고장진단 시스템을 구성하기 위해서는 각각의 미지입력 관측기(UIO $_i, i=1, \dots, m$)에 [정리2.2]를 만족해야 하며, 이러한 조건을 모두 만족하는 시스템은 현실적으로 극히 제한되어 있다. 또한, 미지입력 관측기에 의한 고장진단은 시스템의 파라미터 변동이나 센서고장에 의해서 관측기로서의 기능이 약화되는 것은 알려진 사실이다.

5. PI 관측기와 미지입력 관측기에 의한 고장진단 시스템

액츄에이터만의 고장진단의 경우, 각각의 관측기에 의한 고장진단 가능성은 4장에서 충분히 검토되었다. 그러나, 센서고장을 고려하는 경우는 고장진단 및 분리가 이루어지지 않으므로, 본 장에서는 각각의 관측기의 장점만으로 구성된 고장진단 시스템을 구성한다.

5.1 액츄에이터만의 고장에 대해서

액츄에이터만의 고장에 대해서는 PI 관측기만으로서 충분한

고장검출 및 분리가 가능하며, 복수의 액츄에이터의 동시고장이 발생하는 경우도 가능하다. 그러나, 액츄에이터의 고장요소에 따라 시스템의 상태에 크게 영향을 미칠 수 있으므로 이러한 변동물에 대한 사전지식이 필요하다.

5.2 센서만의 고장에 대해서

센서만의 고장일지라도 PI 관측기 및 미지입력 관측기의 출력에 영향을 미치므로, 이 결과 액츄에이터의 추정치 $\hat{d}(t)$ 도 다르게 된다. 따라서, 이러한 경우에는 출력치의 오차의 정보를 이용하여 잔사를 구해야 한다.

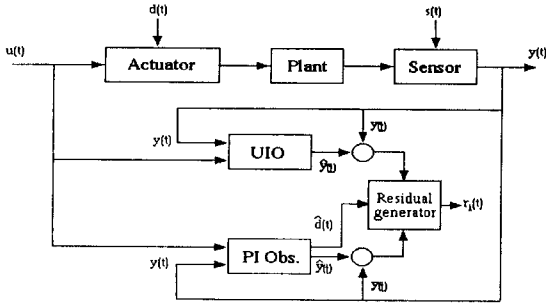


Fig. 2 A fault diagnosis scheme using PI observer and UIO

본 논문에서의 고장진단 시스템은 Fig. 2와 같이 구성하며, 잔사발생기는 다음과 같이 한다.

$$r_{di}(t) = \omega(t); \text{ for } e_{umi}(t) < J_{thi} \text{ and } e_{pfi}(t) < J_{thi} \quad (30)$$

$$(i = 1, \dots, m)$$

$$r_{sj}(t) = \begin{cases} e_{pfj}(t) & ; \text{ for } e_{umi}(t) < J_{thj} \text{ and } e_{pfj}(t) > J_{thj} \\ e_{umi}(t) & ; \text{ for } e_{umi}(t) > J_{thj} \text{ and } e_{pfj}(t) < J_{thj} \\ 0 & ; \text{ for } e_{umi}(t) > J_{thj} \text{ and } e_{pfj}(t) > J_{thj} \end{cases}$$

(31)

$$(j = 1, \dots, p)$$

여기서,

$r_{di}(t)$: i 번째 액츄에이터 고장에 대한 잔사

$r_{sj}(t)$: j 번째 센서 고장에 대한 잔사

또한,

$$e_{umi}(t) = y_i(t) - \hat{y}_{umi}(t)$$

$$e_{pfi}(t) = y_i(t) - \hat{y}_{pfi}(t)$$

이며, 여기서 $y_i(t)$, $\hat{y}_{umi}(t)$, $\hat{y}_{pfi}(t)$ 는 각각 i 번째 출력, 미지입력 관측기의 관측출력 및 PI 관측기의 관측출력을 나타낸다. 따라서, 시스템의 고장유무는 다음과 같이 할 수 있다.

$$r_{di}(t) \geq J_{thi}; \text{ Fault of } i\text{th actuator}$$

$$r_{sj}(t) \geq J_{thj}; \text{ Fault of } j\text{th sensor}$$

여기서, J_{thi} 는 시스템의 상태변수의 특성을 나타낸다.

6. 시뮬레이션

다음의 선형시불변 시스템을 고려하자^[13].

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1.0 & 0.3096 & 0.0 \\ 0 & -1.0541 & 1.1395 & -14.2955 \\ 0 & -1.0238 & -0.2981 & -0.7717 \\ 0.1338 & 0.2957 & -0.9550 & -0.0981 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -7.8013 & -1.1160 \\ 1.8013 & -0.6584 \\ 0.1454 & 0.0169 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

6.1 PI 관측기의 설계

시스템 Σ 에서 모든 액츄에이터의 고장을 진단하기 위해 $N=B$ 로 하여 PI 관측기를 설계한다. PI 관측기의 고유치를 $\{-1.1, -1.2, -1.3, -1.4, -2, -10\}$ 이로한 경우 관측기 게인은

$$L_P = \begin{bmatrix} 2.7639 & 1.3627 \\ 3.1077 & 12.786 \\ 7.3490 & 3.0604 \\ -13.208 & 0.3879 \end{bmatrix}, \quad L_I = \begin{bmatrix} 15.295 & -3.2409 \\ 50.898 & -14.874 \end{bmatrix}$$

으로 된다.

6.2 미지입력 관측기 설계

위의 시스템은 [정리2.2] 조건을 만족하므로 미지입력 관측기 설계가 가능하며, (12)~(16)식에 의해서 미지입력 관측기의 파라미터는 설계된다.

여기서

$$Z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \hat{D} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 0 \\ 3 & 0 & 1 \\ 4 & -0.0176 & 0.0043 \end{bmatrix}$$

이며,

$$\lambda_i(UA - KC) = \{-1.1, -1.2, -1.3, -1.4\}$$

으로 되도록 게인 K 를 극대치법에 의해 설계하였다. 따라서 구해진 파라미터는 다음과 같이 된다.

$$K = \begin{bmatrix} 1.202 & 9.39e-4 & 3.768e-3 \\ 0.0005 & 0.0926 & -0.8528 \\ 0.0039 & -3.204 & 0.4313 \\ -6.57e+10 & 1.2e+14 & -3.52e+13 \end{bmatrix}$$

6.3 시뮬레이션 결과

시스템 Σ 에 대해서 0.01초의 샘플링시간으로 시뮬레이션을 하였으며 입력은 $u(t) = [0.5 \ 0.5]^T$ 으로 하였다. 액츄에이터 및 센서 고장으로서 각각 0.5의 스텝을 가하였으며 이때의 결과를 다음과 같이 보인다.

6.3.1 액츄에이터만의 고장에 대해서

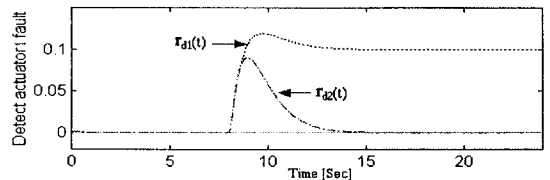


Fig.3 Failure of actuator 1 at $t=8$ [sec] ($d_1=0.1$)

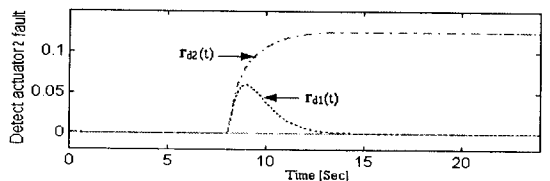


Fig.4 Failure of actuator 2 at $t=8$ [sec] ($d_2=0.5$)

7. 결론

본 논문에서는 비례적분(PI) 관측기와 미지입력 관측기(UIO)를 이용하여 시스템의 액추에이터 및 센서의 고장진단을 하였다. 종래의 m 개의 미지입력 관측기를 이용한 결과 보다 본 방법은 각각의 관측기의 장점을 살린 방법이라 할 수 있다. 액추에이터만의 고장의 경우, 고장의 검출 및 분리가 완벽하며 센서고장만의 경우는 부분적인 고장진단이 가능하다. 또한, 액추에이터와 센서의 동시 고장의 경우는 고장 검출은 가능하나 분리의 방법에 있어서 개선의 문제가 남아 있다.

참고문헌

- [1] A.S. Willsky, "A survey of design methods for failure detection in dynamic systems", *Automatica*, Vol. 12, pp. 601-611, 1976
- [2] R. Isermann, "Process fault detection based on modelling and estimation methods : A survey", *Automatica*, Vol. 20, pp. 387-404, 1984
- [3] R.N. Clark, "Instrument fault detection", *IEEE Trans. Aero. and Electr. Syst.* AES-14, pp. 456-465, 1978
- [4] P.M. Frank and L. Keller, "Sensitivity discriminating observer design for instrument failure detection", *IEEE Trans. Aero. and Electr. Syst.* AES-16, (4), 1980
- [5] B. Wojciechowski, "Analysis and synthesis of proportional integral observers for single input single output time invariant continuous systems", Ph.D. dissertation, Gliwice, Poland, 1978
- [6] B.D.O. Anderson and J.B. Moore, "Optimal Control : Linear Quadratic Methods", Prentice-Hall, 1989
- [7] S. Beale and B. Shafai, "Robust Control System design with a Proportional Integral Observer", *Int. J. Control*, Vol. 50, pp. 97-111, 1989
- [8] S. Kawaji and H.S. Kim, "Simultaneous Recovery of Loop Transfer Property and Disturbance Attenuation Property by PI observer", *Proc. of the ASCC*, Tokyo, Japan, pp. 17-20, 1994
- [9] S. Kawaji and H.S. Kim, "Full Order Observer for Linear Descriptor Systems with Unknown-Inputs", *Proc. of the 34th CDC*, New Orleans, pp. 2366-2368, 1995
- [10] R.N. Clark, "The Dedicated observer approach to instrument failure detection", *Proc. of the 15th CDC*, Fort Lauderdale, pp. 237-241, 1979
- [11] R.J. Patton, P.M. Frank and R.N. Clark, "Fault Diagnosis in Dynamic Systems : Theory and Application", Prentice Hall, 1989
- [12] M. Hou and P.C. Muller, "Fault detection and isolation observers", *Int. J. Control*, Vol. 60, pp. 827-846, 1994
- [13] N. Viswanadham and R. Srichander, "Fault Detection using Unknown Input Observers", *Control Theory and Advanced Technology*, Vol. 3, No. 2, pp. 91-101, 1987

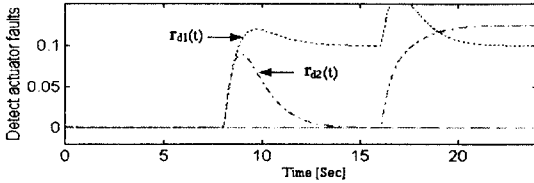


Fig.5 Failure of act. 1,2 $t=8,16$ [sec] $d_1=0.1, d_2=0.5$

6.3.2 센서만의 고장에 대해서

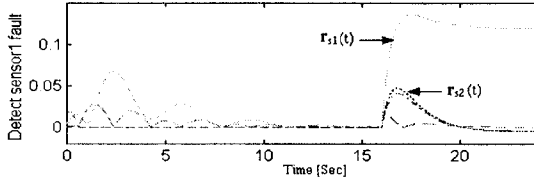


Fig.6 Failure of sensor 1 at $t=16$ [sec] ($s_1=0.01$)

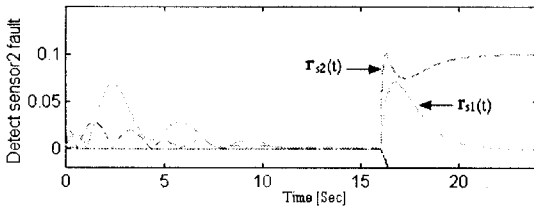


Fig.7 Failure of sensor 2 at $t=16$ [sec] ($s_1=0.02$)

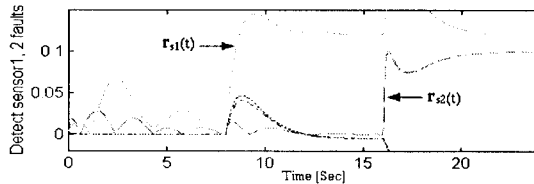


Fig.8 Failure of sensor 1 and 2 at $t=8,16$ [sec]

6.3.3 액추에이터와 센서고장에 대하여

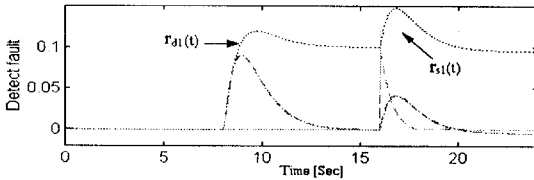


Fig.9 Failures of actuator 1 and sensor 1 at $t=8,16$ [sec]
($d_1=0.1, s_1=0.01$)

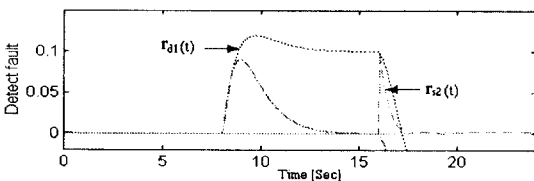


Fig.10 Failures of actuator 1 and sensor 2 at $t=8,16$ [sec]