

논문 2006-43IE-4-13

# 구동기의 미지고장추정을 위한 적분관측기 설계

(Design of Integral Observers for Unknown Actuator Faults Estimation)

안 비 오\*, 이 명 규\*\*, 김 재 일\*\*\*

(P. Ahn, M. K. Lee, and J. I. Kim)

## 요 약

본 논문에서는 센서잡음을 갖는 선형동적시스템의 미지의 구동기 고장을 추정할 수 있는 적분관측기 설계에 대해서 다루었다. 일반적으로 UIO(unknown input observer) 설계 방법은 다양한 형태로 존재해 왔으나, 본 논문에서는 새로운 형태의 적분관측기를 제안함으로써 출력 측 잡음이 있을 경우에 대해서도 미지입력으로 분류한 구동기 고장을 기존의 적분 관측기에 비해 우수한 성능으로 추정할 수 있었다.

## Abstract

This paper deals with the estimation of unknown actuator faults for linear dynamic systems with sensor noise. The presented method based on the integral observer permits to achieve good convergence and exact estimation of unknown faults. The validity of proposed method is established by using the simulation results which compare to the existing methods.

**Keywords :** unknown actuator faults, linear dynamic systems, integral observer

## I. 서 론

보다 강인한 시스템제어가 이루어지기 위해서는 시스템에 도입되는 외란 혹은 예기치 않은 고장 발생의 문제를 고려해야 한다. 이러한 고장에 의해 시스템에 도입되는 미지입력추정을 위해, 비례관측기를 이용한 방법들이 최근 여러 각도에서 활발히 연구되어 왔다<sup>[1-10]</sup>. Wang<sup>[1]</sup>은 좌표 변환을 통한 축소 차수 관측기 설계 방법을 제시하였고, Bhattacharyya<sup>[2]</sup>, Miller와 Mukundan<sup>[3]</sup>, Fairman<sup>[4]</sup> 등은 각각 기하학적 접근 방법, 일반화된 역행렬을 통한 접근 방법, 특이치 분해 방법

등의 다양한 축소 차수 관측기 설계 방법들을 제안하였다. 특히 최근에 Hou와 Müller<sup>[5]</sup>는 대상 시스템을 좌표 변환을 이용하여 미지 입력으로부터 자유로운 상태 벡터와 그렇지 못한 상태 벡터로 분리 한 뒤, 미지 입력으로부터 자유로운 상태 벡터에 대한 축소 차수 관측기를 설계하고, 추정된 상태를 이용하여 미지 입력 값을 계산할 수 있는 체계적인 방법을 소개하였다. Y. Guan 과 M. Saif<sup>[6]</sup>는 한번의 좌표 변환만을 이용하여 변환된 동적 방정식을 유도하고, 이에 대한 Luenberger 관측기를 설계하였다. 이 방법은 좌표 변환 행렬의 선정 방법이 결정되어 있다는 장점을 갖고 있다. 그러나 이러한 접근은, 비례이득에 비례하여 측정 잡음이 증폭되는 문제가 발생하기 때문에, 측정 잡음이 있는 시스템의 고장 추정을 다루는 데는 적합하지 않다. 구동기의 고장 등의 원인에 의해 시스템에 유입되는 미지입력을 추정하기 위해, 유도된 미지입력 추정방정식에는 추정된 상태 벡터의 미분 항을 포함하게 된다. 이러한 미분 항은 작은 잡음이나 추정오차에도 민감하게 반응하여 유입되는 미지입력의 추정을 어렵게 한다. 본 연구에서는 구동기

\* 정회원, 중소기업진흥공단 구조고도화센터  
(Business Innovation Center, Small BusinessCorporation)

\*\* 정회원, 경성대학교 전기전자공학과  
(Department of Electrical/Electronic Engineering, Kyung Sung University)

\*\*\* 정회원, 동의과학대학 자동차과  
(Department of Automobile, Dong Eui Institute of Technology)

접수일자: 2006년9월25일, 수정완료일: 2006년12월6일

의 고장에 의해 시스템에 유입되는 미지입력을 추정하기 위하여, 기존의 비례관측기와는 다른, 새로운 적분관측기를 도입함으로써 측정 잡음이 있는 시스템의 미지 고장신호에 대한 정확한 추정이 이루어질 수 있음을 보인다. 본 연구의 적분관측기는 측정 잡음이 존재하는 경우에도 상태추정의 정확성을 높이면서 측정 잡음의 영향을 최소화하여 기존의 방법보다 더욱 정확하게 구동기의 미지 고장을 추정할 수 있게 해준다.

## II. 적분관측기를 이용한 구동기의 미지고장 추정

### 1. 구동기의 고장추정

시스템의 구동기에 미지고장이 발생한 경우 그림 1 과 같이 나타낼 수 있다.

그림 1에서  $f(t)$ 는 구동기 측에 유입되는 미지입력이다. 이러한 미지 입력이 존재하면, 플랜트가 오동작하게 되고, 원하는 출력을 얻을 수 없게 된다. 구동기의 고장은 불감대에 의한 고장과 포화에 의한 고장으로 대별된다. 불감대에 의한 고장은 구동기의 비선형성으로 표현되기도 한다. 포화에 의한 고장은 구동기들의 동작범위가 한정되어있기 때문에 발생된다<sup>[9]</sup>. 시스템에 구동기의 고장이 발생한 경우 다음과 같이 모델링 할 수 있다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bw(t) \tag{1}$$

$$w(t) = u(t) + f(t) \tag{2}$$

$w(t)$ 는 플랜트에 인가되는 구동기의 출력이며,  $f(t)$ 는 고장을 나타내는 신호이다. 고장이 발생하지 않을 때는  $w(t) = u(t)$ 이다.

불감대에 의한 고장은 구동기의 마찰 등의 원인에 의해 구동기의 출력이 제한 받게 될 때 발생하는 것으로

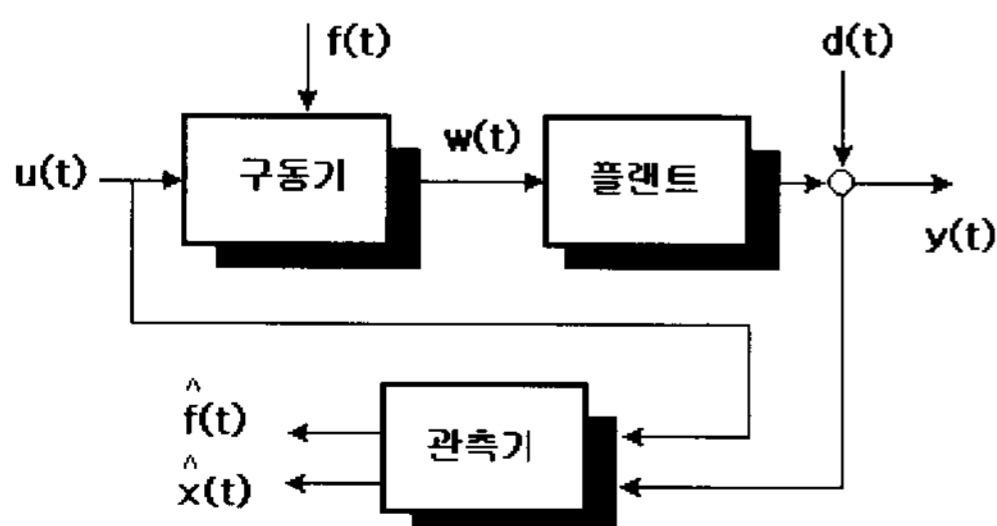


그림 1. 구동기의 미지 고장추정 시스템  
Fig. 1. Schematic diagram for estimation of unknown actuator fault.

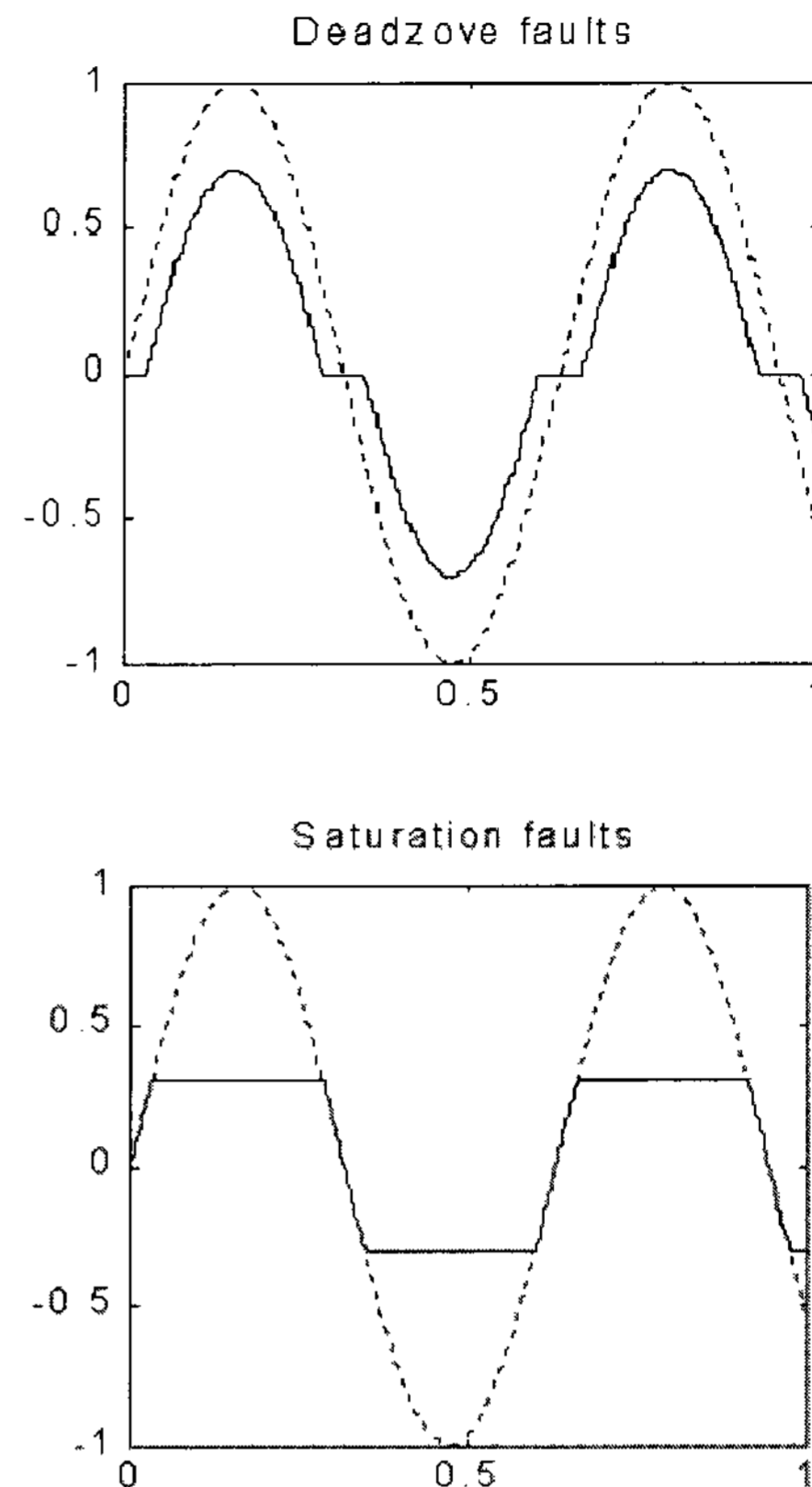


그림 2. 구동기의 출력 및 고장  
Fig. 2. Actuator output & its faults.

다음과 같이 표현된다.

포화에 의한 고장은 제어입력의 일부분이 구동기의 동작범위를 벗어나는 데서 기인하는 것으로 다음과 같이 나타낼 수 있다. 그림 2는 불감대에 의한 한 구동기의 고장과 포화에 의한 구동기의 고장을 나타낸다. 점선은 요구되는 구동기의 출력이며, 실선은 고장이 발생한 구동기의 출력이다.

이와 같이 구동기의 고장이 포함된 시스템을 다음과 같이 나타낸다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ff(t) \tag{3}$$

$$y(t) = Cx(t) + d(t)$$

위 식에서 구동기의 미지 고장신호는 다음과 같이 알 수 있다.

$$f(t) = [F^T F]^{-1} F^T [\dot{x}(t) - Ax(t) - Bu(t)] \tag{4}$$

그러나 시스템 내부의 상태변수는 직접 측정에 의해 알 수 없는 경우가 대부분이어서 정확한 상태의 관측을 필요로 한다. 실제로 직접 측정할 수 있다 하더라도 측정 잡음에 의해 큰 영향을 받기 때문에 어떤 고장이 발

생되었는지 알기 힘들다. 따라서 상태 추정에 의한 구동기의 고장추정을 위한 방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{f}(t) = [F^T F]^{-1} F^T [\dot{\hat{x}}(t) - A\hat{x}(t) - Bu(t)] \quad (5)$$

식(5)에서 보듯이 고장추정방정식에는 미분 항을 포함하고 있다. 이 미분 항은 추정된 상태변수 값의 작은 오차에도 아주 민감하게 반응하기 때문에 구동기의 고장추정을 어렵게 한다. 따라서 고장추정의 정밀도를 높이기 위해서는 정확한 상태변수의 추정이 요구되며, 또한 추정된 상태변수는 출력 측에 포함되는 측정오차에 둔감해야 한다.

## 2. 비례관측기

시스템에 고장이 발생하지 않고 출력 측에 측정 잡음이 존재하는 경우, 단일 출력 시스템의 상태변수를 추정하는 문제를 고려한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + d(t) \end{aligned} \quad (6)$$

$x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)] \in R^n$  와  $u(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t)] \in R^m$ 는 각각 상태벡터와 제어입력벡터이고,  $y(t) \in R$ ,  $d(t) \in R$ 는 출력과 출력잡음을 나타낸다.  $A, B, C$ 는 각각 적절한 차원을 갖는 시스템행렬이다.  $(A, C)$ 가 가관측하다면, 일반적인 비례관측기인 Luenberger 관측기로부터, 다음과 같이, 식(6)로 주어진 시스템의 상태를 추정할 수 있다<sup>[1-11]</sup>.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + K_p[y(t) - \hat{y}(t)] \\ &= [A - K_p C]\hat{x}(t) + Bu(t) + K_p y(t) \end{aligned} \quad (7)$$

$K_p$ 는 관측기의 비례이득이다. 여기서  $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$  라고하면 다음의 추정오차 방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{e}(t) = (A - K_p C)e(t) - K_p d(t) \quad (8)$$

$K_p$ 는 관측기의 상태 관측오차를 보정하기 위해  $[AK_p - C]$ 가 안정하도록 결정한다. 식(8)에서 출력 측에 측정 잡음이 있는 경우엔 이 잡음이 관측기의 비례이득만큼 증폭되어 오차방정식에 인가됨을 알 수 있다.

## 3. 외란에 강한 적분관측기

식(6)으로 주어진 시스템에서 구동기의 미지고장추정을 위한 적분관측기를 구성하기 위해  $x_{n+1}(t) =$

$$\int_0^t y(\tau) d\tau \text{ 라고 하면,}$$

$$\dot{x}_{n+1}(t) = Cx(t) + d(t) \quad (9)$$

이며, 식(6)과 식(9)를 행렬-벡터방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{x}_{n+1}(t) \end{bmatrix} &= \\ \begin{bmatrix} A & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ x_{n+1}(t) \end{bmatrix} &+ \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} d(t) \end{aligned} \quad (10)$$

위 식을 편의상 다음과 같이 나타낸다.

$$\dot{z}(t) = A_N z(t) + B_N u(t) + E_N d(t) \quad (11)$$

$$\text{단, } z(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ x_{n+1}(t) \end{bmatrix}, A_N = \begin{bmatrix} A & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix}, B_N = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, E_N = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \text{이다.}$$

식 (11)의 관측기를 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{z}}(t) &= A_N \hat{z}(t) + B_N u(t) + K_I (y_N(t) - C_N \hat{z}(t)) \\ y_N(t) &= C_N \hat{z}(t) \end{aligned} \quad (12)$$

단,  $C_N = [0 \dots 0 \ 1]$ 이며,  $(A_N, C_N)$ 가 가관측해야 한다. 위 식에서  $y_N(t) = x_{n+1}(t)$ 이고, 이는 출력의 적분을 의미한다.

여기서  $e(t) = z(t) - \hat{z}(t)$ 라할 때 오차 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{e}(t) = (A_N - K_I C_N)e(t) + E_N d(t) \quad (13)$$

$C_N^T = E_N$ 이고, 적분관측기 이득  $K_I$ 는  $(A_N - K_I C_N)$ 가 안정하도록 결정한다. 상태 추정에 있어 기존의 비례관측기는 관측기의 이득에 비례하여 측정 잡음이 증폭되는 단점이 있으나, 본 연구의 적분관측기는 식(13)에서 보듯이  $K_I$ 값의 크기에 따른 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

## III. 시뮬레이션

S. P. Linder<sup>[9]</sup>의 문헌에서 다루어진 시스템을 예로

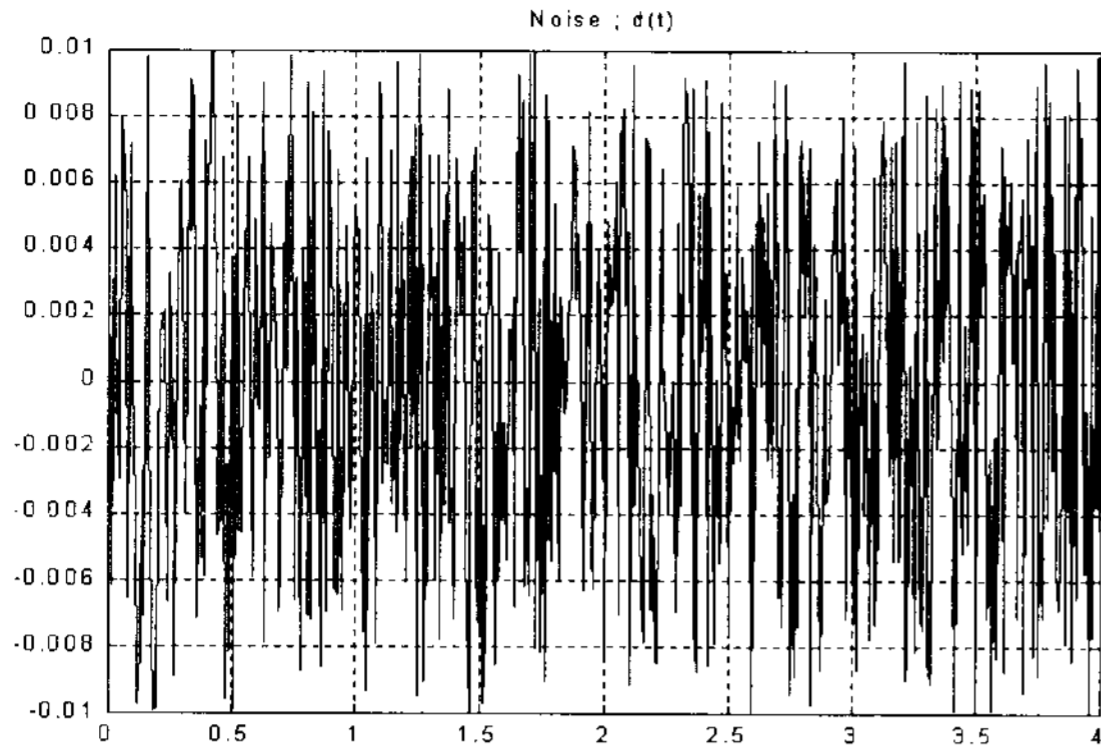


그림 3. 측정잡음  
Fig. 3. Measurement Noise.

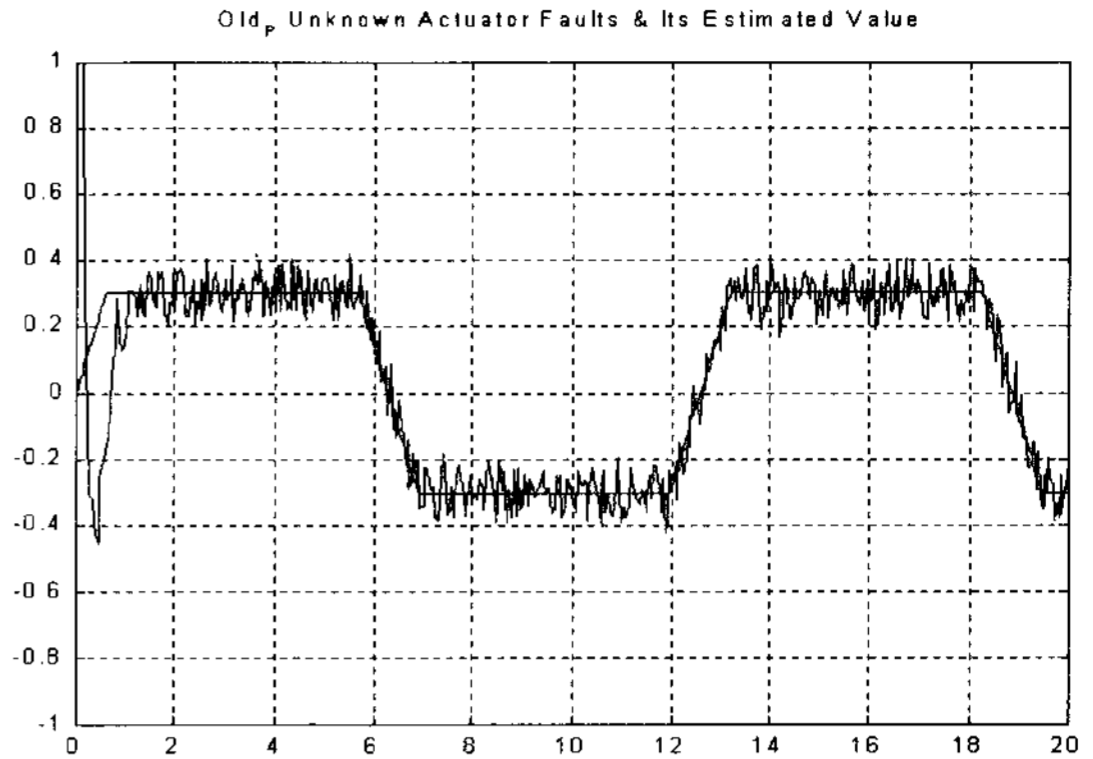


그림 5. 비례관측기에 의한 (불감대)고장추정  
Fig. 5. Deadzone fault estimation via proportional observer.

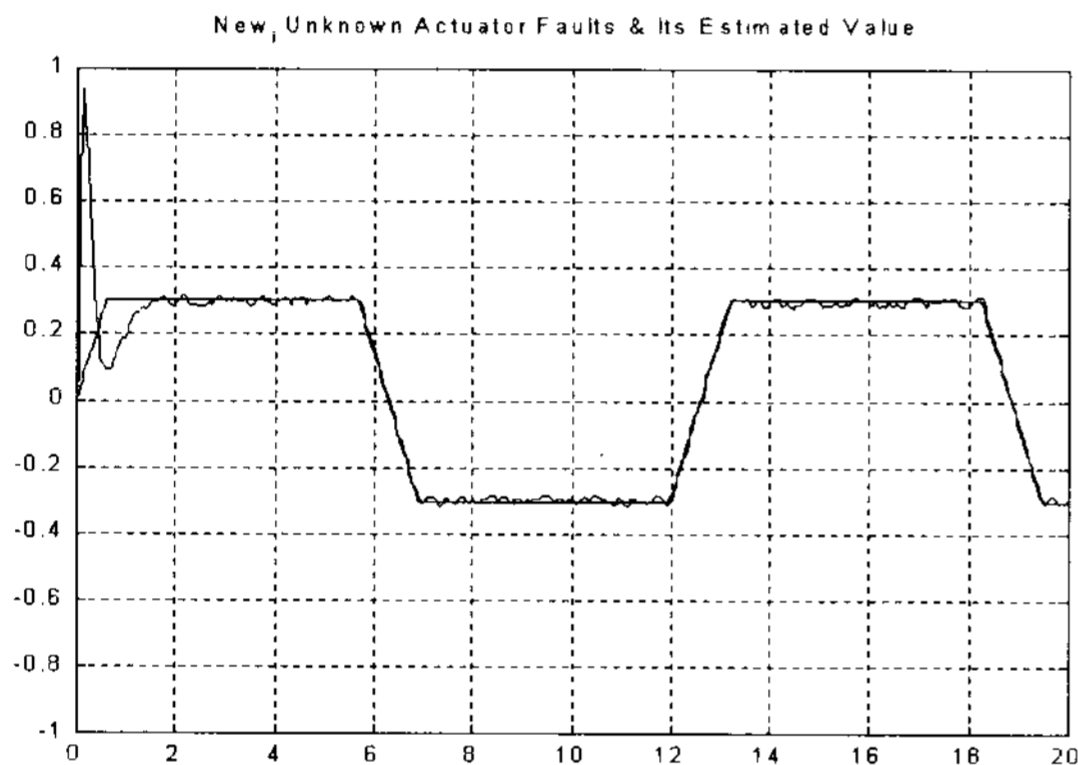


그림 4. 적분관측기에 의한 (불감대)고장추정  
Fig. 4. Deadzone fault estimation via integral observer.

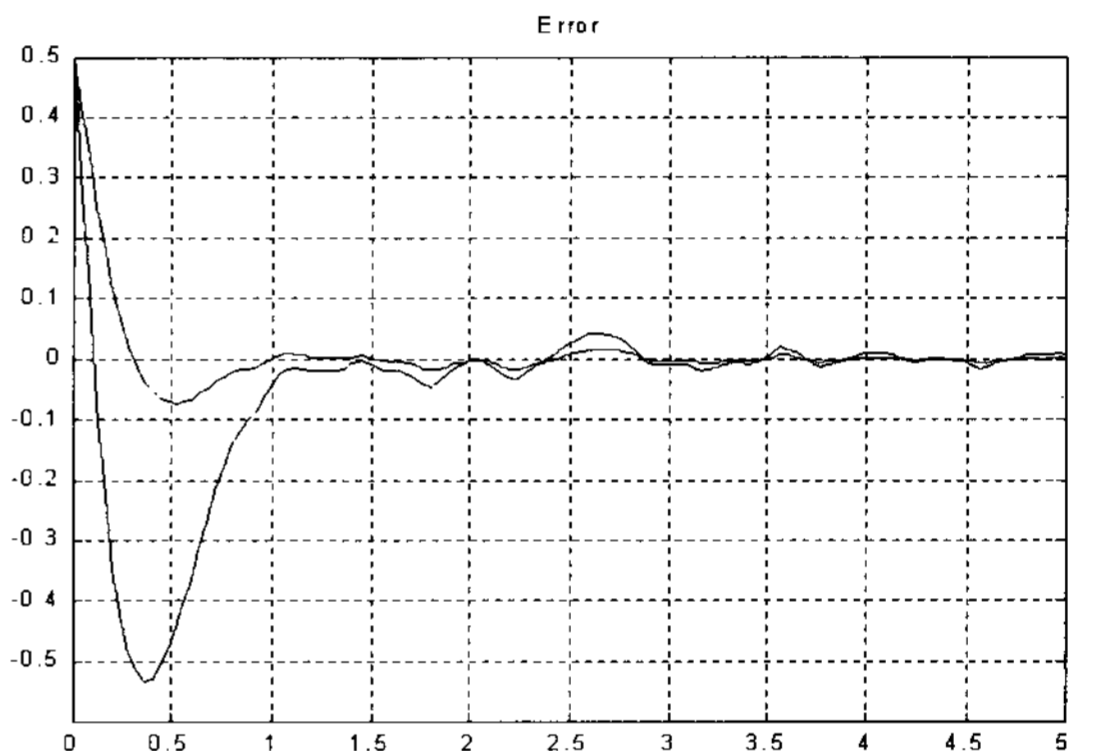


그림 6. 적분관측기에 의한 상태추정 오차  
Fig. 6. State estimation error via integral observer.

든다. 여기에 측정 잡음을 부가하면 다음과 같다.

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} -5 & 1 \\ -100 & \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix} w(t)$$

$$y(t) = [1 \ 0]x(t) + d(t)$$

위 시스템은 가관측 동적방정식으로 표현되어 있다. 이제 제어입력을  $u(t) = \sin(0.5t)$  으로 하고, 출력 측에 도입되는 측정 잡음  $d(t)$ 는 그림 3과 같다고 가정한다.

여기서  $\dot{x}_3(t) = y(t)$ 라고 할 때 상태추정 오차방정식은 다음과 같다.

$$\dot{e}(t) = (A_N - K_I C_N)e(t) + E_N d(t) = \begin{bmatrix} -51 - K_{i1} \\ -100 - K_{i2} \\ 10 - K_{i3} \end{bmatrix} e(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} d(t)$$

관측기의 극점을 -6에 중복되도록 배치할 때, 적분관측기의 이득은  $K_I^T = [33 \ 86 \ 13]$ 이다. 플랜트에는 제

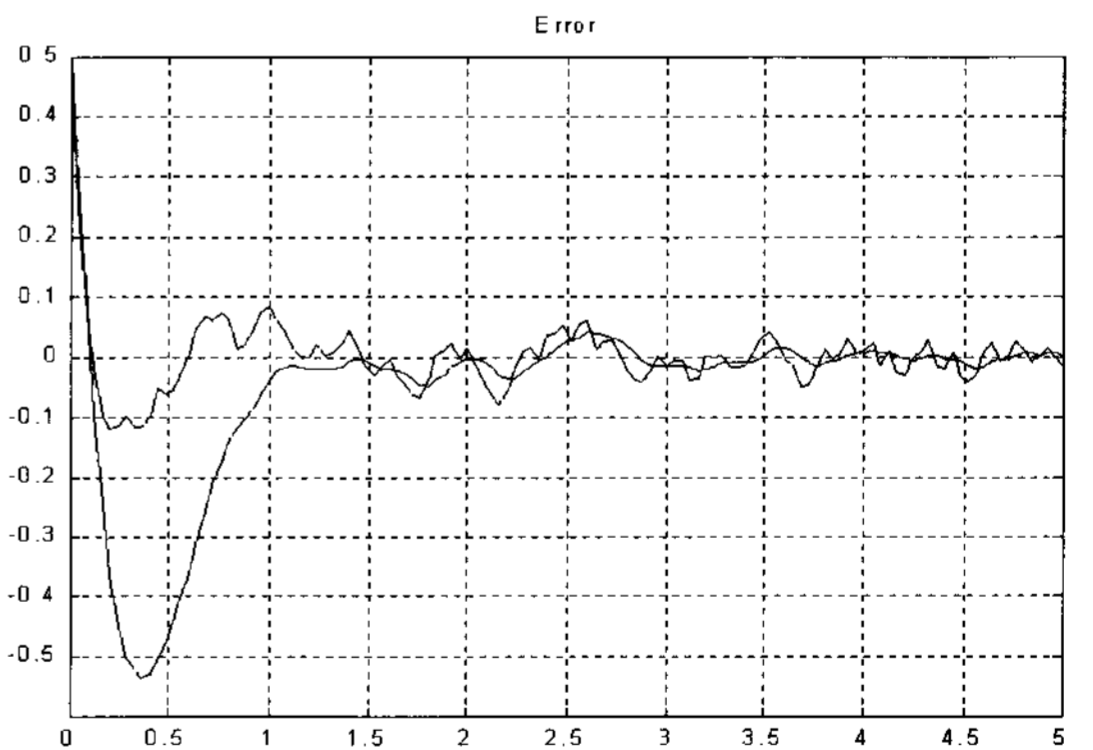


그림 7. 비례관측기에 의한 상태추정 오차  
Fig. 7. State estimation error via proportional observer.

어입력  $u(t)$ 가 인가되어야하는데 불감대에 의한 고장이 발생하여 다음과 같은 신호가 플랜트에 인가되었다고 하자.

$$w(t) = \begin{cases} u(t) - 0.3, & \text{if } u(t) \geq 0.3 \\ 0, & \text{if } -0.3 \leq u(t) \leq 0.3 \\ u(t) + 0.3, & \text{if } u(t) \leq -0.3 \end{cases}$$

그림 4는 적분관측기를 이용하여 추정된 고장신호이고, 그림 5는 기존의 비례관측기를 이용할 때의 결과이다. 관측기의 극점을 -6에 중복되도록 배치할 때, 기존의 비례관측기의 비례이득은  $K_p^T = [7\ 26]$ 이다. 위 결과에서 보듯이 본 연구에 의한 고장추정 결과는 기존의 결과에 비해 매우 만족할만하다. 본 연구의 상태관측기에 의한 결과는 잡음에 둔감한 반면, 기존의 방식은 잡음에 민감함을 알 수 있다. 이러한 원인은 상태 추정 오차로부터 이해될 수 있다. 그림 6, 7은 적분관측기와 기존의 비례관측기를 이용한 상태추정 오차를 보여준다. 따라서 상태추정오차가 적고 평활한 본 연구에 의한 고장추정치가 기존의 방법에 의한 결과보다 더 우수함을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

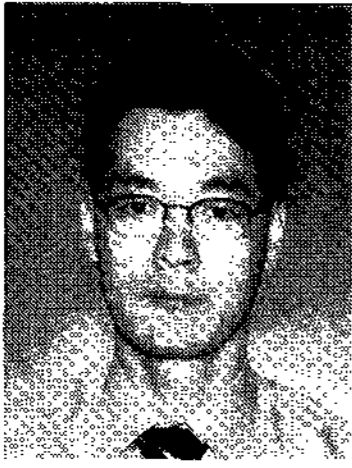
본 연구에서는 출력 측에 잡음이 있는 경우, 구동기 고장이나 오작동 등의 원인에 의해 예기치 않게, 시스템에 도입되는 미지입력을 적분관측기를 이용하여 추정하는 방법을 제시하였다. 적분관측기를 이용함으로써, 출력 측에 잡음이 있는 경우에도 시스템의 상태변수를 정확히 추정할 수 있음을 보였고, 구동기의 고장에 의한 미지입력 추정 성능도 기존의 방법에 비해 더욱 우수함을 알 수 있었다. 잡음이 없는 경우는, 본 연구의 방법이나 기존의 비례관측기를 이용한 방법에 의한 결과 모두 미지입력성능이 뛰어나지만, 잡음이 있는 경우엔 본 연구의 방법이 더욱 뛰어난 것을 알 수 있었다. 이러한 원인은 미지고장 추정방정식에 포함된 미분항에 기인하는 것으로, 본 연구에 의해 추정된 상태벡터 값이 기존의 방법에 한 결과보다 더 정확하고 평활하기 때문임을 알 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

[1] S.H.Wang, E.J.Davison, P.Dorato, "Observing the state of systems with unmeasurable disturbance", *IEEE Trans. Automatic Control*, vol.20, pp.716-717, 1975.  
 [2] Bhattacharyya, S. P., "Observer design for linear systems with unknown inputs," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 23, pp. 483-484, 1978.  
 [3] R.J.Miller, R.Mukundan, "On designing reduced order observers for the time invariant systems subject to unknown inputs", *International*

*Journal of Control*, vol.35, pp.183-188, 1982.  
 [4] F.W.Fairman, S.S.Mahil, and L.Luk, "Disturbance decoupled observer design via singular value decomposition," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 29, pp. 84-86, 1984.  
 [5] M.Hou and P.C.Muller, "Design of observers for linear systems with unknown inputs," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 37, pp. 871-875, 1992.  
 [6] Y. Guan and M. Saif, "A novel approach to the design of unknown input observer," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 36, pp. 632- 635, 1991.  
 [7] 이재혁, 변증남, "미지입력이 존재하는 선형시스템에 대한 축소 차수 관측기설계", *대한전기학회 논문지 제43권 제1호*, pp. 71-75, 1994.  
 [8] 안비오, 이명규, 안두수, "STWS를 이용한 선형 시불변시스템의 미지입력 관측기 설계에 관한 연구", *대한전기학회 논문지 제 46 권 제 1 호*, pp 128-131, 1997.  
 [9] S.P.Linder, B.Shafai, M.saif, "Estimating and accommodating unknown actuator faults with PI observers", *Proceeding of the 1998 IEEE*, pp.461-465, 1998.  
 [10] K. K. Busawon, P. Kabore, "Disturbance attenuation using proportional integral observers", *International Journal of Control*, vol.76, no.6, pp.618-627, 2001.

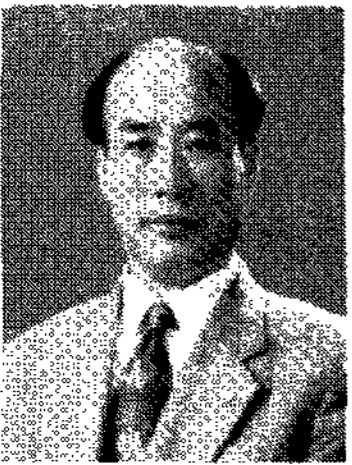
저 자 소 개



**안 비 오**(정회원)  
 1992년 성균관대학교 전기공학과  
 학사졸업.  
 1994년 성균관대학교 대학원  
 석사졸업.  
 1998년 성균관대학교 대학원  
 박사졸업(제어공학).  
 1999년~2000년 한국원자력연구소 Post Doc.  
 2000년~2001년 (주)마이다스코리아 연구소장  
 2002년~현재 중소기업진흥공단 과장  
 <주관심분야 : 제어공학, 임베디드 시스템, IT응  
 용>



**이 명 규**(정회원)  
 1982년 성균관대학교 전기공학과  
 학사졸업.  
 1984년 성균관대학교 대학원  
 석사졸업.  
 1990년 성균관대학교 대학원  
 박사졸업(제어공학)  
 1991년~현재 경성대학교 전기전자공학과 교수  
 <주관심분야 : 제어공학, 회로이론, 직교이론>



**김 재 일**(정회원)  
 1971년 광운대학교 전자공학과  
 학사졸업.  
 1979년 건국대학교 대학원  
 석사졸업.  
 1996년 성균관대학교 대학원  
 박사졸업(제어공학)  
 1978년~현재 동의과학대학 자동차과 교수  
 <주관심분야 : 제어공학, 자동차공학, 컴퓨터응  
 용>