

바이어스 추정기에 의한 탱크 레벨시스템 고장검출 및 진단

* 이 철 용 *, 박 정 화 *, 유 재 형 *, 이 상 정 **

* 한국원자력연구소 공정공학실

**충남대학교 공과대학 전자공학과

Fault Detection and Diagnosis for a Tank Level System by Bias Estimator

Chul Yong Lee, Jung Hwa Park*, Jae Hyung Yoo*, Sang Jeong Lee**

* Dept. of Process Eng.,KAERI

**Dept. of Electronics Eng.,Chungnam National University

ABSTRACT

This paper deals with designing a real-time fault and accommodation system. The LQG controller is adopted in the normal state and the output of LQG controller is corrected using Separated Bias Estimator in the faulty state. The proposed scheme has been applied to the two-tank control system and showed satisfactory performance.

1. 서 론

시스템의 자연적 인위적 고장요인에 대해서 신뢰도와 안전성 향상을 위한 연구는 디지털시스템과 발달된 컴퓨터 기술을 이용하여 그 중요성이 인식되고 있다.

시스템내의 고장은 계속장치와 프로세스 고장으로 구분 되는데, 계속장치에 일어나는 고장은 갑작스런 바이어스의 발생이며 프로세스의 고장은 프로세스 파라미터의 변화 및 구동장치의 고장으로 이들의 고장은 시스템 제어계에 나쁜 영향을 미친다. 따라서 시스템에 고장 발생시 고장검출 및 진단과 올바른 고장보상을 하여 고장의 영향을 최소화하게 하는 고장보상 시스템은 그 실제 적용범위가 넓다.

본 논문에서는 2-탱크 레벨 시스템에 대해서 계속장치 고장과 프로세스 고장시, 고장을 검출하고 진단하는 방법을 연구하였다. 정상상태에서는 LQG 제어를 사용하며, 고장 발생시 Friedland의 SBE(separated bias estimation)기법을 사용하여 고장검출후 LQG제어의 출력을 보상하는, 실시간(real time)고장보상 제어시스템을 설계하고 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통해서 그 타당성을 확인하였다.

2. 바이어스 추정기에 의한 고장검출

정상상태에서 다음식으로 표현되는 선형계통을 고려하자.

$$X(k) = \hat{Q} X(k-1) + DU(k-1) + W(k) \quad (2.1)$$

$$y(k) = AX(k) + V(k) \quad (2.2)$$

여기서 \hat{Q} 와 D , A 는 각각 pxp , pxr , rxp 상수 행렬이고, $V(k)$ 와 $W(k)$ 는 평균값이 영(zero)이고 공분산이 Q , R 인 Gaussian 백색잡음이다.

첫식에 프로세스와 계속기 고장으로 인해 발생하는 바이어스를 고려하면 다음과 같이 표현되어 진다.

$$X(k) = \hat{Q} X(k-1) + DU(k-1) + B(k-1)b + W(k) \quad (2.3)$$

$$y(k) = AX(k) + C(k)b + V(k) \quad (2.4)$$

여기서 b 는 고장벡터로 프로세스와 계속기 고장이 동시

에 발생하지 아니한다고 할때에, 프로세스 고장을 검출할시 는 계측장치의 고장벡터 C(k)항은 영으로 둔다.

정상상태에서의 모델링으로 부터 계통의 상태를 추정하 기 위해서 칼만필터(kalman filter)[1-3] 를 사용한다.

$$\tilde{X}(k-1) = \phi \tilde{X}(k-1) + DU(k-1) \quad (2.5)$$

$$\hat{P}(k) = \phi \hat{P}(k) \phi' + Q(k+1) \quad (2.6)$$

$$K(k) = P(k)A' [A \hat{P}(k)A' + R(k)]^{-1} \quad (2.7)$$

$$\hat{P}(k+1) = \hat{P}(k) - K(k)A \hat{P}(k) \quad (2.8)$$

$$r(k) = Y(k) - A \tilde{X}(k-1) \quad (2.9)$$

$$\tilde{X}(k) = \tilde{X}(k-1) + K(k)[Y(k) - A\tilde{X}(k-1)] \quad (2.10)$$

시스템이 정상 상태에서는 innovation r(k)는 거의 영의 값을 나타내지만 고장발생시 r(k)값은 크게 증가하게 되고 시스템의 상태 추정값 X(k)은 더이상 올바른 값을 추정하지 못한다. 따라서 고장발생시 고장의 종류와 고장의 크기를 추정하기 위해서 Friedland SBE 기법을 사용한다. 시스템에 고장으로 인해 바이어스 b가 생기는데, 이 바이어스를 추정 하기 위한 Friedland 의 SBE 는 다음과 같다[1-3].

$$\hat{b}(k) = [I - G(k)S(k)] \hat{b}(k-1) + G(k)r(k) \quad (2.11)$$

$$G(k) = M(k+1)[A(k)V(k) + C(k)]' R(k)^{-1} \quad (2.12)$$

$$S(k) = AU(k) + C(k) \quad (2.13)$$

$$V(k) = U(k) - K(k)S(k) \quad (2.14)$$

$$K(k) = P(k)A' [AP(k)A' + R(k)]^{-1} \quad (2.15)$$

$$U(k+1) = \phi A(k)V(k) + B(k) \quad (2.16)$$

$$M^{-1}(k+1) = M^{-1}(k) + S'(k)[AP(k)A' + R(k)]^{-1}S(k) \quad (2.17)$$

여기서 r(k) 는 칼만필터의 innovation 이다.

따라서 바이어스 b가 발생시 상태 X의 최적추정치는 바이어스가 없다고 가정하여 칼만필터에 의해 추정한 $\tilde{X}(k)$ 값과 SBE 기법에서 구한 바이어스값과 더해져 식(2.18) 과 같이 보상된다.

$$\hat{X}(k) = \tilde{X}(k) + V(k)\hat{b}(k) \quad (2.18)$$

계통의 고장유무의 판정은 칼만필터의 innovation 으로 부터 알수있다. 즉 정상상태에서 r(k)의 평균값은 거의 영

에 가까운 값을 가지나, 일단 고장이 발생하면 고장의 크 기와 계통의 동특성에 따라서 innovation 값이 임계영역을 벗어나게 되는데, 칼만필터의 innovation으로 부터 구동되 는 SBE기법에 의한 고장판단에 기준이 되는 식은 (2.19)과 같다.

$$r(k) = S(k)b(k) + r_0 \quad (2.19)$$

여기서 r₀는 계통의 정상은전시 칼만필터의 innovation 이다.

식 (2.19)에서와 같이 만일 시간 k에서 고장이 발생하였 다면 그 고장난 성분 b(k)에 의해서 r(k)값이 설정된 임계 치를 넘어가게 된다. 이와같이 계통의 고장판단에 사용되 는 r(k)의 임계값 선정은 고장판단에 중요한데 가장 적절 한 r(k)의 임계값 선정은 실제 계통의 정상은전에서 부터 발생되는 값을 가지고 구하여야한다. 또한 과도기간중에 오버슈트가 포함될 수 있으므로 식 (2.20) 와 같은 평균임 계값 (MTH; mean threshold) 를 사용한다.

$$MTH_i(k) = \sum_{j=k-N+1}^k r_i(j) / N, \quad i=1,2,\dots,m \quad (2.20)$$

따라서 MTH_i(k)가 계통으로부터 적절히 선정된 임계값보 다 클때 고장판단을 하게 된다.

3. 탱크 레벨시스템에 적용

3.1 탱크 레벨시스템 모델링 및 고장보상 제어

그림1. 은 2-탱크 레벨시스템의 실험장치 구성도이다. 탱크의 단면적이 A 이고, 탱크1의 유입량은 q, 유체저항은 R 일때 모델식은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/RA & 0 \\ 1/RA & -1/RA \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/A \\ 0 \end{bmatrix} [q] \quad (2.21)$$

정상상태에서 q는 3 l/min 이고, A는 0.0045 m², 탱크레벨 h는 0.2m 일때 측정시간을 1초로 하면 다음과 같은 이산식 이 된다.

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.7166 & 0 \\ 0.2388 & 0.7166 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 8.90 \\ 2.98 \end{bmatrix} [q] \quad (2.22)$$

$$y_m = X_2$$

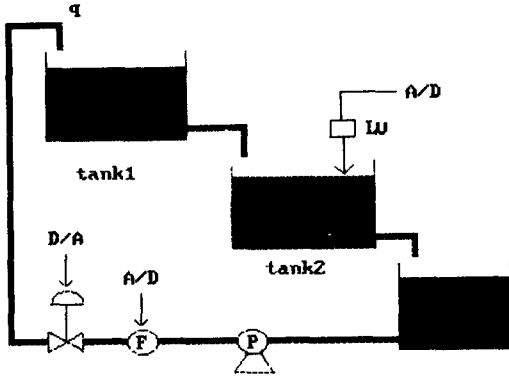


그림1. 2-tank level system

레귤레이터로 동작하는 제어계의 궤환 이득 K는

$K = [0.0404 \quad 0.0150]$ 으로 구해지며, 정상상태에서 궤환되는 제어입력은 $U^* = U_0 - K\delta\tilde{X}$ 된다. 그러나 시스템에 계측장치의 고장 발생시 식 (2.20)의 고장판단에 의해 제어입력은 $\delta\tilde{X}$ 대신에 바이어스 추정기에서 구한 δX_b 으로 부터 $U^* = U_0 - K\delta X_b$ 이 제어입력이 된다. 또한 프로세스 고장시, 바이어스 추정기에서 구한 최적상태값 X_b 으로 부터 제어입력은 $U^* = U_0 - K\delta X_b$ 가 되는데 이 값으로는 본래의 제어 목적을 달성하지 못한다. 따라서 고장으로 인한 추가적인 제어입력 $\delta U_a = -D^*Bb_b$ 를 첨가한다[4-6]. 그림2. 는 전체적인 고장보상 제어계 구성도를 보여준다.

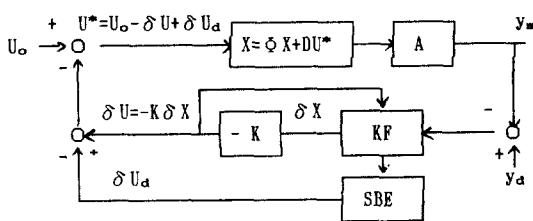


그림2. 고장보상 제어계 구성도

3.2 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험

2-탱크 레벨시스템에 적용할 프로세스 고장은 구동기 고

장으로 콘트롤밸브(control valve)가 정상상태에서는 제어입력이 탱크1으로 유입된 유량이 3 l/min 로 동작하다가 고장으로 인해 유입 유량이 4 l/min 으로 증가하였을 경우를 고려하였다. 그림3.은 t=60 에서 콘트롤밸브 고장시 컴퓨터 시뮬레이션 결과이다. 또한 그림4.는 콘트롤밸브 고장시 고장에 대한 보상제어 결과의 시뮬레이션이다. 즉 그림3. 예서와 같이 탱크1과 탱크2의 레벨이 콘트롤 밸브의 고장으로 인해 약 5cm가 증가하였으나, 그림4. 는 정확히 고장을 보상하여 정상상태로 회복하였다. 그림5.와 그림6. 는 이와같은 콘트롤 밸브의 고장시 실험결과로서 그림6.과 같이 t=100 에서 콘트롤 밸브에 올바른 제어입력을 보내어 준다. 그러나 실험에서는 각 탱크의 지연시간으로 인해 탱크레벨의 정상회복 시간은 상당히 오래걸렸다.

그림7.과 그림8.은 계측장치의 고장에 대한 결과이다.

그림7.은 t=60 에서 레벨센서의 바이어스가 3cm 발생시 고장을 보상하였을때 제어입력과 바이어스의 추정값이다. 그리고 그림8.은 t=40 에서 3cm의 레벨센서의 고장발생시 고장 검출과 고장보상 실험결과이다. 이들의 결과와 같이 계측장치의 고장에도 불구하고 바이어스 추정과 정확한 보상제어로 시스템의 고장영향은 거의없었다.

4. 결론

2-탱크 레벨시스템에 대해서 프로세스 고장과 계측장치 고장시 고장을 검출하고 고장의 영향을 배제하는 고장보상제어계를 구성하였다. 이들의 고장에 대해서 컴퓨터 시뮬레이션 결과는 신속한 고장검출과 효과적인 제어를 수행하였다. 물론 실험을 통해서도 이들의 결과를 확인할 수 있었으나 프로세스 고장시 시스템의 공정 특성때문에 신속한 제어 효과를 얻기 어려움을 알 수 있다. 그러나 상태와 바이어스를 분리하여 추정하는 SBE 방법에 의한 고장검출과 고장보상에 의한 제어방법은 계통의 신뢰성 향상을 증진시킬 수 있었다.

참고 문헌

- [1] B.Friedland, "Treatment of bias in recursive filtering," IERE Trans.Automat.Contr., vol.AC-14,No.4,

pp.359- 367,1969.

[2] B.Friedland,"Recursive filtering in the presence of biases with irreducible uncertainty," IEEE Trans. Automat.Contr.,vol.AC-21,No.3, pp.789-790,1976.

[3] B.Friedland,"Notes on seperate-biasestimation," IEEE Trans.Automat.Contr.,vol.AC-23,No.4,pp.735-738,1978.

[4] 박의성외2인,"A new fault detection and accomodaton scheme in estimator based control system," '88자동제어 학술회,pp.197-201.

[5] C.D.Johnson,"A diacrete-time disturbance accommdating control theory for digital control of dynamical systems,"Control and Dynamic Systems,vol.18,pp.223-315, 1982.

[6] B.Bellingham and F.P.Lees "Practical state and bias estimation of process system with initial information uncertainty," INT.J.SYSTEMS SCI.,vol.8,no.7,pp.813-840, 1977.

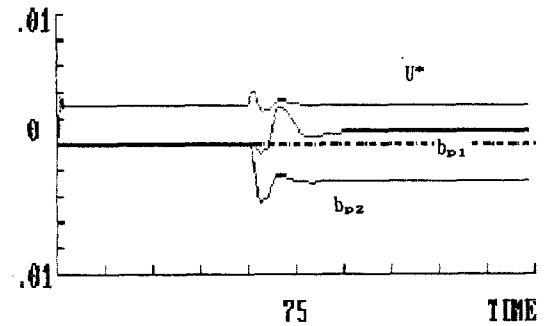
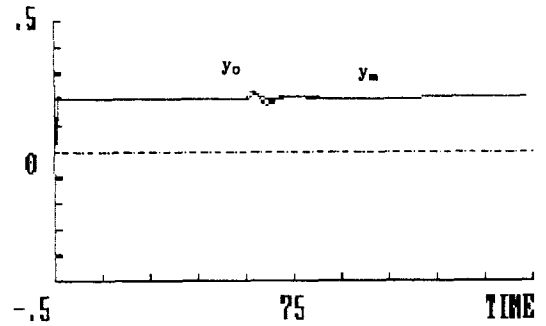


그림4. 콘트롤벨브 고장보상시 시뮬레이션

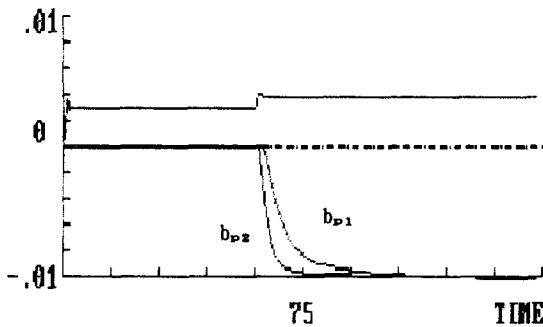
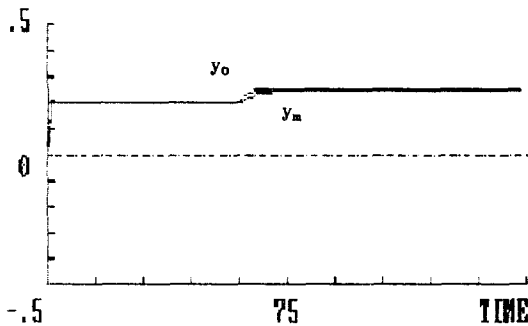


그림3. 콘트롤벨브 고장시 시뮬레이션

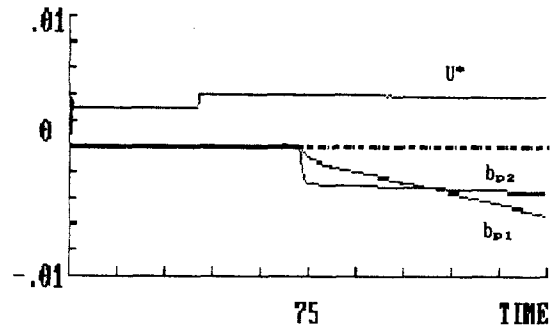


그림5. 콘트롤벨브 고장시 실험

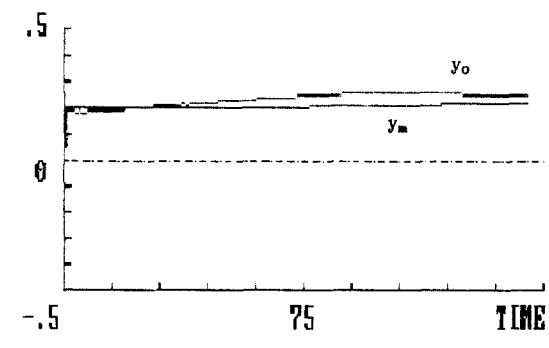


그림6. 콘트롤밸브 고장보상시 실험

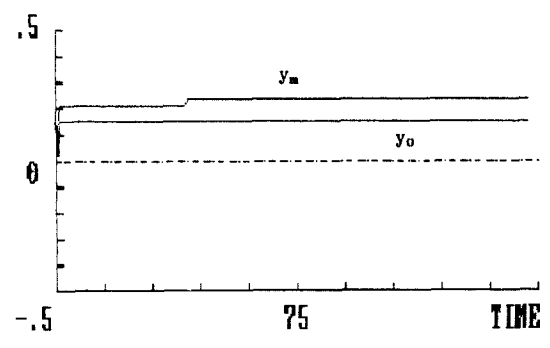


그림8. 레벨센서 고장보상시 실험

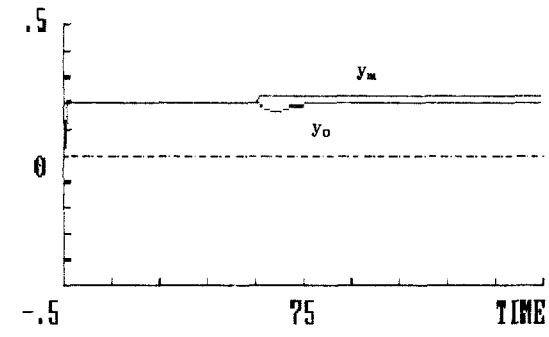
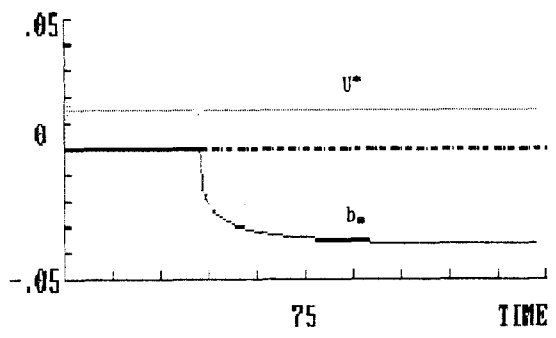
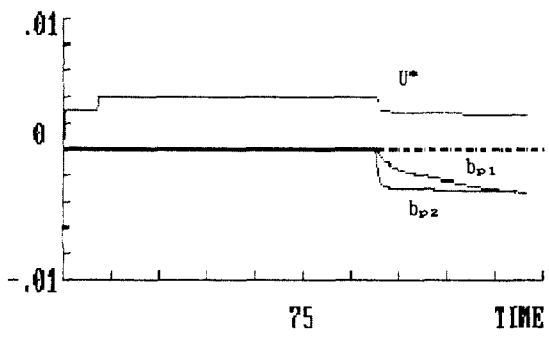


그림7. 레벨센서 고장보상시 시뮬레이션

