

## Observer를 이용한 화학공정의 이상감지

° 최용진, 오영석, 윤인섭  
서울대학교 화학공학과

### Fault Detection of Chemical Process using Observer Scheme

° Y.J. Choe, Y.S. Oh and E.S. Yoon  
Dept. of Chem. Engineering  
Seoul National University

#### ABSTRACTS

This paper presents a fault detection strategy that discriminates the faulty sensor and that detects the component fault using a bank of observers for the system in which sensor fault and component fault can occur simultaneously. Observers as many as the number of measurements are designed, and each observer uses measurements excluding sequentially one measurement, to estimate the state variables. The faulty sensor can be found out by comparing each state variable from different observer. Next, component fault can be detected by using measurements from the sensors excluding the faulty sensor.

The suggested strategy is applied to a nonisothermal, series reaction with unknown reaction kinetics in a CSTR. This strategy is found out to perform well even in the case that the sensor and component fault occur simultaneously. Since each observer is designed to be independent of reaction kinetics, this strategy is not affected by the model uncertainty and nonlinearity of the reaction kinetics.

#### 1. 서론

제어시스템을 설계하는데 있어서 전체 상태변수들을 측정을 통해서 얻을 수 있다고 가정하는 것은 편리하다. 그러나 측정할 수 없는 상태변수가 있다면 새로운 설계방법을 고려해 보든가 아니면 적절하게 근사시키는 방법이 사용된다. 따라서 상태변수를 근사시키는 시스템이 필요한데 이를 observer라 부른다. 1964년에 Luenberger에 의해 처음 제안된 observer는 deterministic continuous-time linear time-invariant 시스템을 위한 것에서 time-varying, discrete, stochastic 시스템으로 확장되고 있다. 화학공정에 적용된 예는 증류탑에서의 농도를 온도를 통해서 추정한 예[3]와 발열반응의 CSTR에서 상태와 매개변수를 추정한 예[4], 역시 CSTR에서 농도를 추정한 예[2]등이 보고되고 있다.

현대 컴퓨터 기술의 눈부신 발전과 이에 따른 수학적 모델링, 상태추정과 매개변수규명의 강력한 기법을 가져온 현대의 제어이론으로부터 이상감지 및 진단에 대한 새로운 철학이 대두하게 되었다. 해석적 redundancy가 바로 그것인데 공정에 부가적인 장비없이 정보처리에 의해 간단하게 처리될 수 있다.

한편 조업비용의 증가와 심각한 사고때문에 공장조업의 신뢰성과 안전성은 나날이 강조되고 있다. 따라서 시기적절한 이상의 감지와 규명은 공정의 성능을 향상시키는데 있어서 매우 중요한 역할을 한다.

이러한 observer 기법의 중요성이 날로 더해가고 있는 이상의 감지와 진단에 이용하려는 노력도 있어왔다[1][2]. 그러나 이들은 대부분 기계, 항공분야에의 적용예들이며 화학공정에 응용한 예는 극히 드물다.

이 논문에서는 반응기구가 잘 알려져있지 않은 반응이 진행되는 CSTR을 대상으로, 반응기구에 무관한 추정치를 구할 수 있고 측정값의 일부만을 사용하는 여러개의 observer를 설계하였다. 그리고 서로 다른 observer에서 추정한 공정변수값과 정상조업 기준값과의 비교를 통하여 센서이상과 공정요소이상을 감지하였다.

#### 2. Observer설계

##### 2.1 CSTR의 동적모델

물질, 에너지 수지식으로 부터 구할 수 있는 CSTR의 동적모델은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dt} &= \frac{F}{V} (T_m - T) - \frac{1}{\rho C_p} \Delta H^r \phi - Q \\ \frac{dC}{dt} &= \frac{F}{V} (C_m - C) + K\phi \end{aligned} \quad (1)$$

식(1)에서 반응속도함은 일반적으로 상태변수 즉 농도와 온도의 비선형함수이며, 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\phi = \kappa(C) E(T) \quad (2)$$

식 (2)에서 온도의존함은 일반적으로 Arrhenius법칙형태로 표현가능하지만 지수함수형태이므로 비선형성이 심하며, 농도의존함은 반응종류에 의존하므로 구하기가 용이하지 않고 또한 비선형인 경우가 대부분이다. 따라서 이 항을 적절히 처리할 수 있는 방법이 필요하다.

## 2.2 Luenberger-like Observer

다음과 같은 모델식에 대하여 Luenberger형태의 observer를 설계한다.

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= Ax + Bu + Qf \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $x$  : 상태벡터

$u$  : 입력벡터

$y$  : 출력벡터

$f$  : 비선형함수

$A, B, C, Q$  : 모델식의 계수행렬

이때 observer의 상태변수  $z$ 와 이로부터 추정할 수 있는 상태변수  $x$ 의 추정치  $\hat{x}$ 는 식(4)로 표시된다.

$$\begin{aligned} \frac{dz}{dt} &= Fz + Ky + MBu \\ \hat{x} &= Dz + Hy \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $z$  : observer 상태변수

$F, K, M, D, H$  : observer의 계수행렬

observer의 추정오차  $e = z - Mx$ 는

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \dot{z} - M\dot{x} \\ &= Fz + (KC-MA)x - MQf \end{aligned} \quad (5)$$

으로 정리되며, 계수행렬들이

$$\begin{aligned} FM &= MA - KC \\ MQ &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

를 만족하면, 식(5)의 추정오차는

$$\dot{e} = Fe$$

이 되며,  $F$ 가 안정될 경우는 시간이 지남에 따라 오차가 0으로 수렴하게 된다. 이때 식(4)로 주어지는 추정치  $\hat{x}$ 는

$$\begin{aligned} \hat{x} &= Dz + Hy \\ &= (DM+HC)x + De \end{aligned} \quad (7)$$

이며,  $DM+HC=I$ 를 만족하면, 잡음경도가 낮을 경우 일정한 시간(settling time)이 경과한 후부터는 상태변수와 같은 값의 추정치를 얻을 수 있다. 그리고, 식(6)의  $MQ = 0$ 에 의해서 비선형함수  $f$ 가 observer설계식인 식(4)에는 나타나지 않으므로 비선형성 및 이에 관련된 모델의 불확실성을 잘 처리할 수 있

다.

즉, 식(3)과 같은 공정이 주어지고 이에 대하여 식(4)형태의 observer를 설계하고자 할때는 아래의 조건을 만족하도록 observer계수행렬  $F, K, M, D, H$ 를 정해지면, 일정한 시간후부터는 만족할 만한 추정값을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} DM + HC &= I \\ FM &= MA - KC \\ MQ &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

## 3. 이상감지전략

어느 한 시스템에 대해서 이상은 작동기(actuator), 공정요소(component), 센서의 세부분에서 발생할 수 있으며, 본 연구에서는 공정요소와 센서에서 동시에 이상이 발생할 수 있는 경우에 대한 이상감지전략을 제시한다. 이 전략을 사용하여 센서에 대해서는 이상이 있는 센서를 판별하여 이상센서의 영향을 제거한 공정상태변수추정값을 구할 수 있으며 공정요소에 대해서는 이상유무와 그 순간의 상태변수의 값을 구하여 이상진단 시스템에 제공할 수 있다. 본 전략을 통한 정보를 받은 이상진단시스템은 구체적인 공정이상원인을 구할 수 있으며 본 연구에서는 이상감지까지만을 다룬다.

우선 측정값중 일부분만을 사용하여 상태변수의 값을 추정하는 observer를 설계한다. 이때 observer의 갯수는 센서에서 동시에 발생할 수 있는 이상의 수에 의존한다. 예를 들면, 센서의 갯수(측정값의 갯수)가  $m$ 인 시스템에서 발생가능한 모든 조합의 센서이상을 고려한 경우 필요한 observer의 갯수는  $2^m - 2$ 개이다. 그러나 본 연구에서는 센서에서는 동시에 둘이상의 이상이 발생하지 않는다고 가정하며 따라서 필요한 observer의 갯수는  $m$ 개이다.

설계한  $m$ 개의 observer를 이용한 이상감지의 전체적인 전략을 Fig. 1에 나타내었다.

각 observer에서 추정한 상태변수값과 오랜 조업에서 얻은 정상조업의 상태변수값을 이용하여 잔차(residual)를 만든다. 이 잔차가 주어진 신뢰구간을 침범하는 경우 즉 식(9)를 만족하지 않으면 경고(alarm)를 발생하게 된다.

$$|\hat{x}_{ij} - x_i^*| \leq \Delta_i$$

$$i = 1, \dots, n$$

$$j = 1, \dots, m$$

여기서  $\hat{x}_{ij}$  :  $j$ 번째 observer로 추정한  $i$ 번째 공정변수 추정값 (9)

$x_i^*$  :  $i$ 번째 공정변수에 대한 정상조업값

$\Delta_i$  :  $i$ 번째 공정변수에 대한 임계값

$m$  : observer의 갯수

$n$  : 공정변수의 갯수

경고 발생한 경우 우선 각 observer에서 예측한 값들을

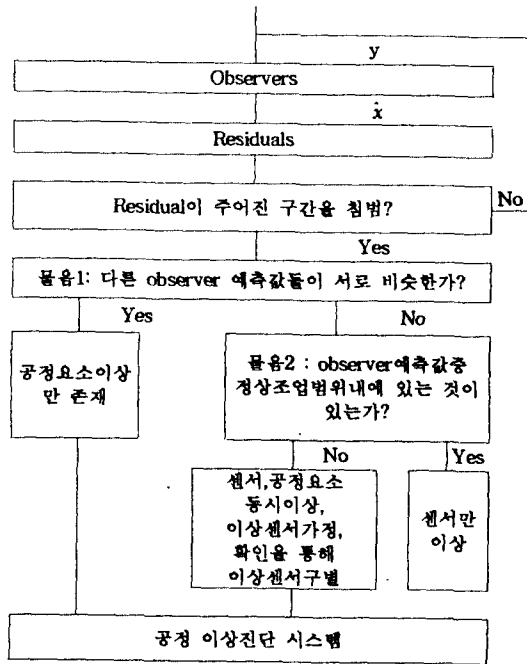


Fig. 1 이상감지 전략의 개념도

서로 비교한다(물음1). 즉 다음식(10)의 만족여부를 조사한다.

$$|\hat{x}_j - \hat{x}_k| \leq \Delta_i \quad (10)$$

$$i = 1, \dots, n$$

$$j, k = 1, \dots, m$$

센서에 이상이 없으면 공정요소의 이상유무에 관계없이 모든 observer의 추정값이 식(10)을 만족하고, 센서에 고장이 발생한 경우 이상이 있는 센서값을 이용한 observer로 추정된 상태변수값과 그 센서값을 사용하지 않은 observer로 추정된 상태변수는 식(10)을 만족하지 않는다. 즉 이상센서값을 사용하지 않은 observer의 추정값만이 그 순간의 공정 상태를 잘 묘사하고 나머지는 센서이상 때문에 공정상태를 묘사하지 못한다. 따라서 각 observer 추정값이 식(10)을 만족하면 센서이상은 존재하지 않으며 추정값들이 식(10)을 만족하지 않으면 센서에 이상이 있다고 판단할 수 있다.

경고 발생후 센서에 이상이 없다고 판단되면 공정요소에 이상이 존재하는 것이므로 공정요소이상발생정보와 그 순간의 상태변수추정값을 이상진단시스템에 제공한다.

센서에 이상이 있는 경우, 각 observer추정값중 식(9)를 만족하는 것이 있는지를 확인한다(물음2). 어느 한 observer의 추정값이 식(9)를 만족하면 공정요소에는 이상이 없는 것이며 그 observer가 사용하지 않은 센서에 이상이 존재한다. 어느 observer의 추정값도 식(9)를 만족하지 않으면 공정요소에도 이상이 발생, 즉 센서와 공정요소에 동시에 이상이 발생한 경우이다.

이 경우는 센서를 차례로 선택해서 그 센서에서 이상이 발생했다고 가정한다. 그리고 그 센서를 사용하지 않은 observer의 추정값과 식(3)을 이용하여 새로운 관측값 즉 가정한 센서의 이상에 영향을 받지 않은 관측값을 얻게 된다. 이 관측값을 각 observer에 통과 시켜서 상태변수의 추정값을 구할 수 있으며 물음1)에 관해서 설명한 것과 마찬가지로 이유에서 추정값들이 식(10)을 만족하면 센서이상 제거되었다고 할 수 있으며 따라서 가정이 옳았다고 판단할 수 있다. 추정값들이 식(10)을 만족하지 못하면 가정이 틀린 것이며 계속해서 다른 센서에 이상이 있다고 가정하고 같은 과정을 반복한다. 이상과 같이 이상센서를 제거한 후 정보를 이상진단시스템에 제공한다.

#### 4. CSTR에 대한 Observer 설계

다음과 같은 연속반응이 진행되고 있는 CSTR을 생각하자.



위 반응에 맞추어 식(1)을 구성한 후 식(3)형태의 state space형태의 식으로 정리하면

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -F/V & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -F/V & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -F/V & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -F/V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{\Delta H_1}{\rho C_p} & -\frac{\Delta H_2}{\rho C_p} \\ -1 & 0 \\ 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix}$$

여기서,

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 \\ C_A \\ C_B \\ C_C \end{bmatrix}$$

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} FT_{in}/V - Q \\ FC_{A,in}/V \\ FC_{B,in}/V \end{bmatrix}$$

이며  $\phi_1$ 과  $\phi_2$ 는 두반응에 관련된 비선형속도항이며, Q는 냉각에 의한 열제거속도이며

$$Q = \frac{hA_c(T - T_c)}{\rho C_p V}$$

로 표시된다. 그리고 세개의 센서로 온도와 A,B의 농도를 측정한다. 따라서

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = y = Cx = [I_3 | 0] x$$

가 성립한다.

이 시스템의 경우는  $y_1, y_2, y_3$  세개의 측정값중 두개만을 이용하여 observer를 설계하며 총 3개의 observer를 설계할 수 있다. 그 중  $y_1, y_2$ 를 이용하여 상태변수  $x$ 를 추정하는

observer는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{F}{V} & 0 \\ 0 & -\frac{F}{V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{\rho C_p}{\Delta H_2} & \frac{\Delta H_1 + \Delta H_2}{\Delta H_2} & 1 \\ \frac{\rho C_p}{\Delta H_2} & -\frac{\Delta H_1}{\Delta H_2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ \frac{\rho C_p}{\Delta H_2} & \frac{\Delta H_1 + \Delta H_2}{\Delta H_2} \\ -\frac{\rho C_p}{\Delta H_2} & \frac{\Delta H_1}{\Delta H_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}$$

이를 OB12로 부르며,  $y_1, y_3$ 를 사용한 observer는 OB13,  $y_2, y_3$ 를 사용한 observer는 OB23이라 부르기로 한다. 이들 observer 식을 보면 알 수 있듯이 반응속도항이 없으며 따라서 반응속도항과 관련된 비선형성과 불확실성을 제거할 수 있다.

이들 observer의 거동을 보기 위하여 식(9)의 반응조건이 다음과 같을 경우를 보사하였다.

반응속도식은

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= k_{01} C_A^2 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right) \\ \varphi_2 &= k_{02} C_B \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right) \end{aligned}$$

으로 표시되며, 관련된 파라미터값은

$k_{01} = 1.11 \text{ l/mol}\cdot\text{s}$	$k_{02} = 172.2 \text{ s}$
$E_1 = 2.09 \times 10^4 \text{ kJ/kmol}$	$E_2 = 4.18 \times 10^4 \text{ kJ/kmol}$
$\Delta H_1 = -4.18 \times 10^4 \text{ kJ/kmol}$	$\Delta H_2 = -8.36 \times 10^4 \text{ kJ/kmol}$
$T_m = 350 \text{ K}$	$h = 5 \text{ kW/m}^2 \text{ K}$
$A_f = 170 \text{ m}^2$	$T_c = 350 \text{ K}$
$F = 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$	$V = 10 \text{ m}^3$
$C_{A, in} = 10 \text{ mol/l}$	$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$
$C_p = 1 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$	

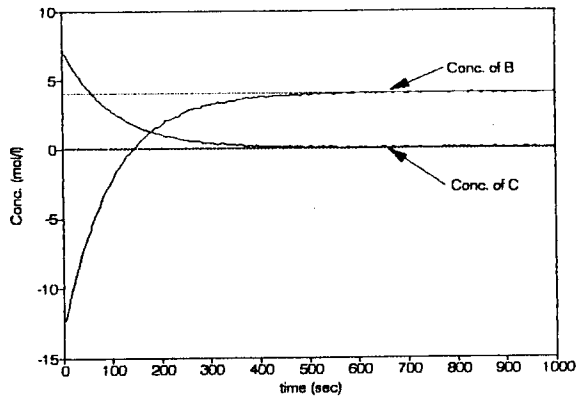
이다.

모사결과를 Fig. 2에 보였다. 각 observer에서 사용된 측정값을 제외한 상태변수에 대한 수렴과정을 표시하였다. 모든 경우의 observer에서 상태변수  $z$ 의 초기값은 0을 사용하였으며, 대략 500초 정도후에는 수렴한다. 일단 observer가 안정이 된 후 그 때의  $z$ 값을 초기값으로 사용하면 항상 수렴한 값을 보인다.

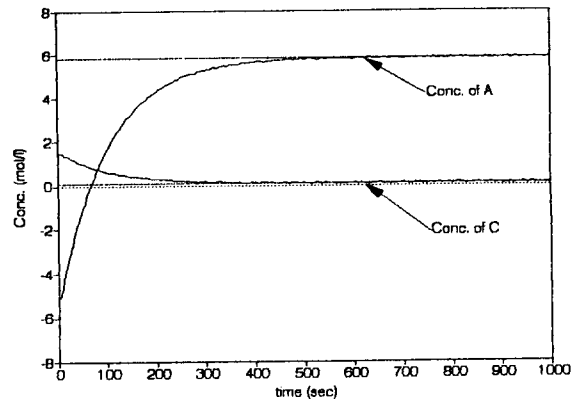
## 5. 이상진단의 예

제한한 이상진단 전략을 몇가지 경우에 적용한다.

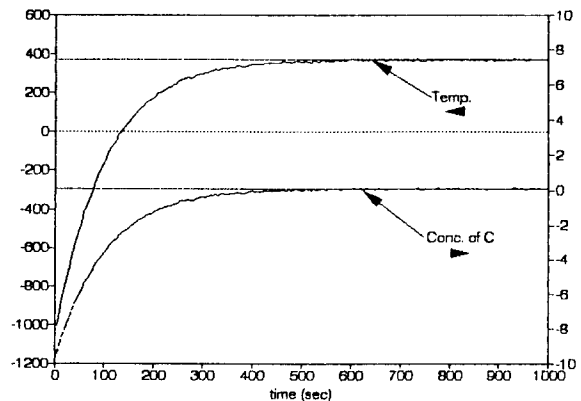
### 5.1 공정요소애 이상이 발생한 경우



a) OB12로 추정된  $C_B, C_C$



b) OB13로 추정된  $C_A, C_C$



c) OB23로 추정된 온도와  $C_C$

Fig. 2 Observer에 의해 관찰된 상태변수

열교환기의 열전달계수를 시간 100초에서  $5 \text{ kW/m}^2 \text{ K}$ 에서  $3 \text{ kW/m}^2 \text{ K}$ 로 변화시킨 경우를 모사한 결과 10초후에 경고가 발생하였다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 시간 110초에서 OB23의 온도추정값이 정해진 구간을 확실히 침범하였다.

제시한 전략을 따라서 계속 수행을 하여 물음(1)에 대한 결과를 Table 1에 나타내었다.

Table 1. 공정이상만 존재시 물음(1)의 결과

	T	$C_A$	$C_B$	$C_C$
OB12 - OB13	0.	-0.03	0.045	-0.0015
OB12 - OB23	-3.779	0.	0.045	-0.0045
OB13 - OB23	-3.779	-0.03	0.	-0.003

모든 값들이 미리 정한 구간에 포함이 되므로 서로 다른 observer의 추정값들이 식(10)을 만족한다. 따라서 공정요소에만 이상이 존재하는 경우로 판단이 되며 그 순간의 공정상태변수값과 함께 공정요소이상발생정보를 공정이상진단시스템로 넘겨 준다.

## 5.2 센서에 이상이 있는 경우

온도센서에 +10의 바이어스를 시간 100초에서 주어 모사한 결과 즉시 경고가 발생하였으며 그 때의 잔여치는 Table 2에 있으며, 물음(1)의 결과는 Table 3에 있다.

Table 2. 센서이상만 존재시의 잔차

	T	$C_A$	$C_B$	$C_C$
OB12	10.317	0.017	0.15	0.133
OB13	10.317	-0.088	0.008	0.08
OB23	-2.829	0.017	0.008	-0.025

OB12, OB13의 온도와 C농도의 잔여치가 주어진 구간을 침범, 즉 식(9)를 만족하지 못하므로 경고가 발생한 것이다.

Table 3. 센서이상만 존재시 물음(1)의 결과

	T	$C_A$	$C_B$	$C_C$
OB12 - OB13	0.	0.105	-0.158	0.053
OB12 - OB23	13.146	0.	-0.158	0.158
OB13 - OB23	13.146	-0.105	0.	0.105

Table 3에서, 온도와 C농도의 추정값이 식(10)을 만족하지 않으므로 센서에 이상이 있다고 판단한다. 계속해서 물음(2)의 결과를 보면 OB23의 추정값이 정상조범위내에 들어감을 알 수 있다. 따라서 공정요소에는 이상이 없고  $y_1$ 을 측정하는 센서 즉 온도센서에 이상이 있다고 판단한다. 이 경우는 그 센서에 대한 조치만 취하면 된다.

## 5.3 센서와 공정요소에 이상이 있는 경우

공정요소의 이상은 그 전파하는데 시간이 조금 걸리므로 센

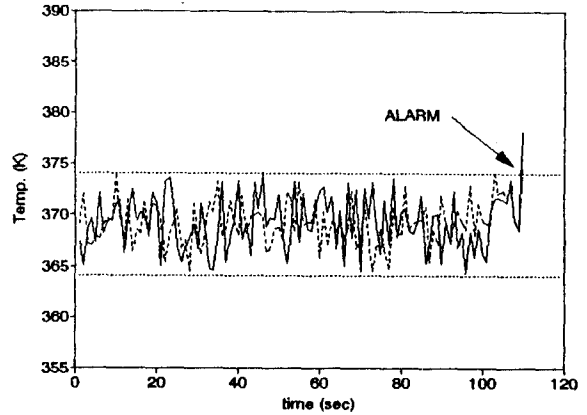


Fig. 3 공정요소 이상시 온도의 변화

서와 공정요소에 동시에 이상이 발생하도록 모사하기 위하여 시간 100초에 열교환기의 열전달계수를  $5 \text{ kW/m}^2 \text{ K}$ 에서  $3 \text{ kW/m}^2 \text{ K}$ 로, 시간 110초에 온도센서에 +10의 바이어스를 주었다. 결과 시간 110초에 경고가 발생하였다.

물음(1)에 대한 식(10)을 만족하지 못하고, 역시 물음(2)에 대한 식(9)를 만족시키지 못하므로 센서와 공정요소에 동시에 이상이 존재하는 경우이다.

$y_1$ 은 관측하는 센서, 즉 온도 센서에 이상이 있다고 가정 한 후 각 observer의 응답에 대한 서로의 차이를 구한 결과를 Table 4에 나타내었다.

Table 4. 센서이상만 존재시 물음(1)의 결과

	T	$C_A$	$C_B$	$C_C$
OB12 - OB13	0.	0.047	-0.071	0.0024
OB12 - OB23	-0.313	0.	-0.071	0.0078
OB13 - OB23	-0.313	-0.047	0.	0.0047

서로간의 차이가 주어진 구간에 포함되며 이는 가정이 틀렸음을 나타내는 것이다. 즉 온도센서에 이상이 존재하며 이를 사용하지 않은 제거한 observer23의 추정값과 공정요소이상발생정보를 이상진단시스템에 제공한다.

## 6. 결론

본 논문에서는 센서와 공정요소에서 동시에 이상이 발생할 수 있는 시스템을 대상으로 여러개의 observer를 이용하여 이상센서를 구별해내고 공정요소이상유무를 감지할 수 있는 이상감지전략을 제시하였다.

설계가능한 observer 갯수는 동시발생가능한 센서이상의 수에 따라 다르며, 본 연구에서는 센서에 단일이상만 발생한다는 가정하에 측정값갯수와 같은 수의 observer를 설계하였다.

서로 다른 observer에서 추정한 공정상태변수값들을 비교함으로써 이상센서존재여부와 이상센서 존재시 고장센서를 구별

할 수 있었다. 그리고 고장이 없는 센서로부터 얻은 측정값을 이용하여 추정된 공정상태변수값과 정상조업값을 비교함으로써 공정요소이상유무를 판단하였다.

제안한 전략을 반응속도항이 잘 알려져 있지않은 비등은, 연속반응이 일어나는 CSTR에 적용하였다. 각 observer는 반응속도항에 무관하도록 설계되었으므로 반응속도항에 관련된 모델의 불확실성, 비선형성에 영향을 받지 않는다. 그리고, 각 상태변수에 관련된 임계값을 설정하고 이 값의 침범여부를 기준으로 서로 다른 observer에서 추정된 추정값들을 비교하였다.

센서에만 이상이 발생한 경우, 공정요소에만 이상이 발생한 경우, 센서와 공정요소에 동시에 이상이 발생한 경우에 대한 모사를 통하여 제시한 이상감지전략이 잘 수행됨을 확인하였다.

## 참고문헌

[1] Clark, R.N., D.C.Fosth, V.M.Waltor, "Detecting Instrument Malfunctions in Control Systems," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, Vol.AES-11, No.4, pp.465-473, 1975.

[2] Dochain, D., M.Perrier, B.E.Ydstie, "Asymptotic

Observers for Stirred Tank Reactors," *Chemical Engineering Science*, Vol.47, No.15/16, pp.4167-4177, 1992.

- [3] Lang, L., E.D.Gilles, "Nonlinear Observers for Distillation Columns," *Computers chem. Engng.*, Vol.14, No.11, pp.1297-1301, 1990.
- [4] Limquenco, L., J.C.Kantor and S.Harvey, "Nonlinear Adaptive Observation of an Exothermic Stirred-Tank Reactor," *Chemical Engineering Science*, Vol.46, No.3, pp.797-805, 1991.
- [5] Patton, R., P.Frank and R.Clark, *Fault Diagnosis in Dynamic Systems Theory and Application*, New York: Prentice-Hall, 1989.
- [6] Seliger, R., P.M.Frank, "Robust Nonlinear Observer-Based Fault Detection for an Overhead Crane," in *12th World Congress IFAC*, Vol.7, Sydney, Australia, July, pp.449-452, 1993.
- [7] Watanabe, T., D.M.Himmelblau, "Fault Diagnosis in Nonlinear Chemical Processes," *AIChE Journal*, Vol.29, No.2, 1983, pp.243-259