

A New Dynamic Residual Generator for Process Fault Detection

李 起 常\* · 李 相 汶\*\*  
(Kee-Sang Lee · Sang-Moon Lee)

**Abstract** - A new FDOs (fault diagnostic observers) and the residual generation schemes using the FDOs are suggested for the process fault detection and isolation of linear (control) systems. The design method of the FDO is described, first, for the full measurement systems. Then it is extended for the systems with unmeasurable state variables. An unknown input observer is proposed and applied for the extension. The size of the observer bank may be the smallest, specially in full measurement systems, because the order of the proposed FDO is very low. In spite of the simplicity, the scheme provides the same information for the detection and isolation of the anticipated faults as the conventional multiple observer based schemes. The residuals may be structured so that fault isolation can be performed by pre-selected logic. An FDIS using the proposed scheme is constructed for the model of the four-tank system. Simulation results show the practical feasibility of the proposed scheme.

**Key Words** : Fault detection, Fault diagnostic observer, Unknown input observer, Residual generation

1. 서 론

상태공간모델을 이용한 고장검출식별기법은 크게 두 개의 접근 방법으로 분류된다. 그 중 하나는 시스템식별과 파라미터 추정기법을 이용한 접근 방법이며, 다른 하나는 상태관측자의 잔차를 분석하여 고장검출 및 식별을 수행하는 상태관측자 접근기법이다[1]. 파라미터 추정기법은 고장 또는 이상이 발생한 요소의 파라미터를 직접 추정하여 정상시의 파라미터 값과 비교함으로써 고장을 검출하고 식별하는 직접적인 기법이다[2]. 이 기법은 연속치 모델에 대한 파라미터 추정 알고리즘을 도입할 경우 프로세스고장의 검출식별에 매우 적합하지만 이산치 모델이 주로 사용되는 실시간 파라미터 추정의 경우에는 고장요소와 모델파라미터의 대응관계가 불확실할 뿐 아니라 지속여기조건이 충족되어야 한다는 점 등의 적용상 어려움이 있다. 따라서 모델기반 고장검출기법 연구는 주로 관측자기법에 집중되어왔다[3-5]. 관측자기법은 다중관측자기법(multiple observer schemes)과 검출필터기법으로 분류된다[6-8]. 검출필터기법은 일반적으로 고장검출과 식별을 한 개의 필터에 의해 수행할 수 있다는 장점이 있지만 고유구조 할당(eigenstructure assignment)기법에 의해 설계되므로 설계조건이 까다로우며 특히 비선형시스템으로의 확장이 곤란하다. 한편 대표적인 다중관측자기법으로는 DOS (dedicated observer scheme), GOS(generalized observer scheme) 등이 있으며[9], 여기에 도입될 관측자들은 일반적

로 가관측조건이 만족될 경우 설계가능하다. 다중관측자기법은 최근 개발된 강인관측자, 비선형관측자 설계기법을 도입함으로써 강인성 설계 및 비선형시스템으로의 확장이 가능해졌다[10]. 이 기법 적용시 최대의 문제점은 잘 알려진 바와 같이 여러 개의 관측자를 병렬적으로 구동하기 위해 요구되는 막대한 계산량으로 인하여 실시간 적용이 어렵다는 점이다.

본 논문에서는 이러한 다중관측자기법의 문제점을 해결하기 위하여 매우 단순한 고장진단관측자(fault diagnostic observer: FDO)와 이를 포함한 새로운 잔차발생알고리즘을 제시하고 그 유용성을 검토함에 있다. 제안된 FDO는 시스템 분해(decomposition)에 근거하여 설계되는 분산관측기 구조를 가지며, 매우 낮은 차원의 동태방정식으로 설계된다. 특히 검출 대상 고장의 차원이 상태벡터 차원보다 낮고, 외란의 영향이 적어 잔차발생기 설계시 그 영향을 고려할 필요가 없는 경우에는 전체 잔차발생기 차수의 합이 시스템 상태벡터의 차원보다 적다. 제안된 잔차발생알고리즘의 또 다른 특징은 미리 선정된 논리에 의해 고장식별이 가능하도록 설계될 수 있다는 점이다. 본 논문의 내용은 다음과 같다. 제2장에는 선형시스템의 잔차발생 문제를 기술하고, 제3장에서는 먼저 모든 상태변수가 측정되는 경우에 대한 FDO설계 및 이를 포함한 잔차발생기구를 제안한 다음 이를 비측정변수가 존재하는 경우로 확장한다. 비측정변수가 존재하는 경우로의 확장을 위해 외란모델링에 근거한 미지입력관측자를 도입하였다. 제4장에는 제안된 잔차발생기구의 유용성을 검토하기 위한 적용사례를 기술하였고, 5장에 결론을 기술한다.

\* 正 會 員 : 단국대학교 전기전자컴퓨터공학부教授 · 工博  
 \*\* 準 會 員 : 단국대학교 대학원 전기공학과 석사과정  
 接受日字 : 2003年 6月 23日  
 最終完了 : 2003年 8月 12日

2. 잔차발생문제

식(1)의 선형시불변계통을 고려하자.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + Ed + Df \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (1)$$

위에서  $x$ 는  $n$ 차원 상태벡터,  $u$ 는  $m$ 차원 입력벡터,  $d$ 는  $r$ 차원 외란 벡터,  $f$ 는  $q$ 차원 고장벡터이며,  $A, B, E$  와  $D$ 는 각각  $(n,n), (n,m), (n,r)$  및  $(n,q)$ 차원의 행렬이다. 또한 행렬  $C$ 는  $(n,p)$ 차원의 출력행렬이다. FDIS를 위한 잔차발생장치에 요구되는 전체 조건은 발생하는 잔차에 대한 임계치 검사 및 논리적 연산을 수행함으로써 발생고장의 검출과 식별이 가능해야 한다는 점이다. 현재까지 가장 많이 연구된 잔차발생기구는 식(2)와 같은 관측자 구조를 가진다[4].

$$\begin{aligned} \dot{z} &= Pz + Ju + Gy \\ r &= L_1z + L_2y \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $z$ 는 관측자의 상태벡터로서 일반적으로 시스템의 차원인  $n$ 과 같거나 작은 차원을 가진다. 이 관측자는 정상상태에서  $z = Tx$ 를 만족하도록 설계되며,  $r$ 는 관측자 출력으로 본 논문에서는 잔차에 해당된다. 고장 검출이 가능하기 위하여 잔차는 다음을 만족하여야 한다.

$$\begin{aligned} f(t) = 0 &\rightarrow r(t) = 0 \quad (t \rightarrow \infty) \\ f(t) \neq 0 &\rightarrow r(t) \neq 0 \end{aligned} \quad (3)$$

식(3)과 같은 잔차를 발생하는 잔차발생기구의 설계조건을 유도하기 위해 추정오차  $\varepsilon = z - Tx$ 를 정의하면 다음방정식이 얻어진다

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon} &= P\varepsilon + (GC - TA)x + (J - TB)u - TE d - T D f \\ r &= L_1(\varepsilon + Tx) + L_2Cx \end{aligned} \quad (4)$$

식(4)에서 행렬  $P$ 의 모든 고유치가 부의 실수부를 가지고, 파라미터  $T, J, L_1$  과  $L_2$ 가 식(5)를 만족하도록 결정된다

$$\begin{aligned} TA - PT &= GC, \quad J = TB, \\ L_1T + L_2C &= 0, \quad TE = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

식(6)의 오차방정식이 얻어진다

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon} &= P\varepsilon - T D f \\ r &= L_1\varepsilon \end{aligned} \quad (6)$$

위에서  $TE=0$ 은 외란이 잔차에 영향을 주지 않기 위한 조건이다. 위의 잔차에 의해 고장 검출과 식별이 가능하기 위해서는 선형변환 후에도 고장의 영향이 잔차에 나타나야 하며, 이 조건은 아래와 같다.

$$\text{rank}(TD) = \text{rank}(D) \quad (7)$$

FDIS는 일반적으로 고장의 검출과 식별기능을 모두 갖추어야 하므로 잔차발생기구는 고장의 식별정보도 제공하도록 설계되어야 한다. 이를 위해서는 고장검출필터 또는 다중관측자기법이 채

택될 수 있다. 본 절에서는 다중관측자기법 중 대표적 기법이라 할 수 있는 GOS의 두가지 설계개념을 설명한다. 검출식별 대상 고장으로 다음의  $q$ 차원 고장벡터를 고려한다.

$$f = [f_1 \ f_2 \ \dots \ f_q]^T \quad (8)$$

(1) 동시고장을 고려하지 않는 경우 : 이 구조의 고장검출식별 시스템은 검출 대상 고장수와 동일한 관측자를 구동하며, 각 관측자는 특정한 한 개의 고장에 대해서 둔감하도록 설계한다[1, 8]. 예를 들어  $i$ 번째 관측자가 외란  $d$  및  $f_i$ 에 대하여 둔감하고 나머지 고장에 민감하도록 설계된다면 다음의 잔차를 얻을 수 있다[1,3].

$$\begin{aligned} r_1 &= \text{UIO}_1(f_2, f_3, \dots, f_q) \\ r_2 &= \text{UIO}_2(f_1, f_3, \dots, f_q) \\ &\vdots \\ r_q &= \text{UIO}_q(f_1, f_2, \dots, f_{q-1}) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서  $\text{UIO}(\cdot)$ 는 미지입력관측자를 의미하며 괄호 안의 변수들은 잔차에 영향을 주는 고장이다. 위의 잔차를 이용하면 단일 고장에 대한 고장식별논리는 매우 단순하다. 즉,

$$\begin{aligned} \text{IF } r_i < \text{th}(i) \text{ and } r_j \geq \text{th}(j), \quad j = 1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, q, \\ \text{Then fault}(i) \text{ occurs} \end{aligned}$$

위의 잔차발생을 위한 UIO는 오직 한 개의 고장에 대해 둔감하도록 설계되므로 그 존재 조건이 비교적 부드럽다는 장점이 있는 반면, 두 개 이상의 고장이 동시에 발생한 경우 고장 식별이 불가능하다는 문제점이 있다.

(2)  $q$ 개 고장의 동시발생을 고려한 경우 : 동시에 발생하는  $q$ 개의 고장을 식별하기 위해서는 다음과 같이 오직 한 개의 고장에 의해서만 영향을 받는 잔차를 발생시켜야 한다[4].

$$\begin{aligned} r_1 &= \text{UIO}_1(f_1) \\ r_2 &= \text{UIO}_2(f_2) \\ &\vdots \\ r_q &= \text{UIO}_q(f_q) \end{aligned} \quad (10)$$

위의 잔차집합의 요소는 모두 독립적이므로  $q$ 개의 동시고장 검출이 가능하며 다음과 같은 매우 단순한 논리에 의해 고장식별을 가능케 한다.

$$\text{If } r_i \geq \text{th}(i), \text{ Then fault}(i) \text{ for } i=1,2,\dots,q$$

이 잔차집합은 고장식별의 관점에서 매우 유용하지만 해당되는 고장신호를 제외한 모든 고장신호에 대해 둔감한 관측자를 설계해야 하며 이러한 UIO의 존재 조건은 매우 까다롭다. 따라서 실제적인 잔차발생기구는 식(9)와 (10)을 절충한 상태에서 UIO설계의 단순성과 식별성능을 고려하여 설계된다. 위에 언급한 고장검출식별시스템에 사용된 UIO는 많은 경우  $n$ 차원의 동태방정식이며 잔차발생을 위해  $q$ 개의  $n$ 차원 관측자가

병렬적으로 구동되어야 하므로, 이를 도입한 고장검출식별시스템의 실시간 적용은 곤란하다. 따라서 동일한 기능을 가지면서 알고리즘이 단순한 잔차발생알고리즘의 제안은 다중관측자기법의 실질적 적용을 위해 매우 중요한 과제로 인식되고 있다[11,12].

### 3. 제안된 잔차발생기구

본 절에서는 기존 다중관측자기법의 문제점을 해결해 줄 수 있는 잔차발생기구를 제안한다. 관측자에 근거한 잔차발생기구는 그 구성 및 설계방법이 관측자와 동일하지만 그 적용목적이 상태추정이 아니라 검출식별하고자하는 고장의 정보를 추출함에 있다. 제안하는 잔차발생기구는 식(1)의 선형시스템을 기능적 또는 수학적인 관점에서 수개의 부계통(블럭요소)으로 분할하고 각 부계통에 대한 관측자를 설계한 결과로서, 식(1)에 대한 분산형 관측자(Decentralized observer) 형태를 가지며 고장진단관측자로 분류된다. 시스템 방정식의 분할시 각 부계통의 차원과 상태변수는 기본적으로 가관측(observability) 조건이 만족되도록 선정되어야 한다. 이 잔차발생기구 제안의 초점은 각 부계통에 유입되는 상태변수의 결합을 (기지의) 외부입력으로 처리하여 분산형 구조를 취함으로써 잔차발생기구인 각 FDO의 차수감소와 함께, FDO간의 상호작용을 배제하여 고장식별논리의 단순화를 모색한다는 점이다. 이러한 특징은 각 부계통의 고장검출신뢰도 개선과 고장모드의 식별을 가능케 해준다. 본 절에서는 전개의 일관성을 위해 각각의 상태변수 방정식을 하나의 부계통으로 간주한다. 제안된 잔차발생기구의 설계과정은 (i) 모든 상태변수가 측정되는 경우와 (ii) 측정 불가능한 상태변수가 존재하는 경우로 나누어 기술된다. 경우(i)에 대한 잔차발생기구는 그 설계과정과 고장 검출식별논리가 단순하지만, 경우(ii)에의 직접 적용이 불가능하다. 따라서 본 논문의 중요 제안은 경우(i)에 대한 고장검출식별기법을 경우(ii)에 적용하기 위한 잔차발생기구의 구조와 설계방법을 제시함에 있다.

#### 3.1 모든 상태변수가 측정되는 경우

이 경우에는 식(1)의 계통은 식(11)과 같이 한 개씩의 상태변수를 갖는  $n$ 개의 부계통으로 분할된다. 각 부계통은 상태변수가 측정 출력이므로 항상 가관측 조건을 만족한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= a_{ii}x_i + \sum_{k=1, k \neq i}^n a_{ik}x_k + \sum_{j=1}^m b_{ij}u_j + \sum_{p=1}^q d_{ip}f_p \\ y_i &= x_i \end{aligned} \quad (11)$$

위에서  $\{x_k, k=1, \dots, i-1, i+1, \dots, n\}$ 는 다른 부계통의 상태변수로서 측정되므로  $i$ 번째 부계통의 입장에서 외부입력으로 간주할 수 있다.  $i$ 번째 부계통에 대한 FDO의 방정식은 다음과 같다

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_i &= g_i \hat{x}_i + l_i y_i + \sum_{k=1, k \neq i}^n a_{ik} \hat{x}_k + \sum_{j=1}^m b_{ij} u_j \\ \hat{y}_i &= \hat{x}_i \end{aligned} \quad (12)$$

여기서  $g_i = (a_{ii} - l_i)$ 이다. 또한  $\hat{y}_i = \hat{x}_i$  이므로 측정출력과 추정출력간의 오차는

$$e_i = y_i - \hat{y}_i = x_i - \hat{x}_i \quad (13)$$

으로 정의되며 식(11), (12)로부터 식(14)의 오차 방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{e}_i = g_i e_i + \sum_{p=1}^q d_{ip} f_p \quad (14)$$

따라서  $\text{re}(g_i)$  가 부의 실수이면 다음 관계가 성립된다.

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} e_i &= 0, \text{ if } d_{ip} f_p = 0 \quad \forall p \\ \lim_{t \rightarrow \infty} e_i &\neq 0, \text{ if } d_{ip} f_p \neq 0 \text{ for any } p \end{aligned} \quad (15)$$

오차의 수렴속도는 각 FDO의 이득  $l_i$ 에 의해 조정된다. 고장은 식(12), (13)에서 구한 오차집합  $E_r = (e_1, e_2, \dots, e_n)^T$ 에 대한 임계치 검사에 의해 검출되지만 고장모드의 식별을 위해서는 고장전달행렬  $D$ 와  $E_r$ 에 근거하여 정의된 식(16)의 잔차를 도입하는 것이 바람직하다.

$$r = WE_r \quad (16)$$

위에서  $r$ 은  $q$  차원 잔차벡터이며  $W$ 는  $(q, n)$ 차원 행렬이다. 가정한 바와 같이  $\text{rank}(D) = q$  이고,  $q < n$  인 경우, 가장 단순한 식별논리를 보장하기 위한 관측자 설계조건과  $W$ 행렬을 다음 정리에 기술하였다.

[정리] 식(16)에서  $W = D'$ 로 선정하면 잔차  $r_i$ 와 고장  $f_i$ 는 1:1 대응 관계를 가지고, 따라서  $q$ 개의 동시 고장을 검출, 식별할 수 있다. 단,  $D'$ 는 의사역행렬로서  $D^+ = (D^T D)^{-1} D^T$ 이다.

증명 : 식(16)의 잔차에 대한 동적 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{r} = WE_r = W[GE_r + Df] = WGE_r + W Df \quad (17)$$

위식에  $W = D^+$ 를 대입하면

$$\dot{r} = D^+ GE_r + D^+ Df = D^+ GE_r + f \quad (18)$$

위에서  $G = \text{diag}(g_1, g_2, \dots, g_n)$ 이다. 위 정리의 증명을 위해 식(18)에 라플라스 변환을 취하여  $r(s)$ 와  $f(s)$ 간의 관계를 구한 결과는 다음과 같다.

$$sr(s) = [D^+ G(sI - G)^{-1} D + I_q] f(s) \quad (19)$$

여기서  $G$ 가 대각행렬임을 고려하면 잔차  $r_i$ 와 고장  $f_i$ 는 1:1 대응 관계인

$$r_i(s) = \frac{1}{s-g_i} f_i(s), \quad i=1,2,\dots,q \quad (20)$$

이 얻어진다. ■

위의 정리는 제안된 FDO가 식(10)의 성질을 가진 잔차를 제공함을 의미한다.

### 3.2 비측정변수가 존재하는 경우

식(11)의 상태방정식에서  $x_j$ 가 비측정변수이면 이 변수를 가진 부계통에 대한 FDO 설계가 불가능하다. 이 경우의 해결방법은 비측정변수를 측정변수와 결합하여 가관측조건을 만족하는 부계통(SS: subsystem)을 구성한 다음 모든 미지 입력과 고장에 대하여 둔감한 특성을 가진 UIO를 설계하여 그 추정결과를 측정결과 대신 이용하는 것이다.

#### 가. 비측정변수의 추정을 위한 미지입력관측자

본절에서 제시하는 UIO는 비측정변수의 추정치를 제공하기 위한 목적으로 설계되는 것이므로 전술한 바와 같이 모든 미지입력과 고장에 대하여 둔감한 특성을 가지도록 설계되어야 한다. 이 부계통에는 여러개의 비측정변수와 여러개의 측정변수가 포함될 수 있으나 본절에서는 단지 두 개의 변수만이 포함된 가장 단순한 구조를 가정한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_s &= A_s x_s + \overline{A}_s \overline{x}_s + B_s u + D_s f \\ y_s &= C_s x_s \end{aligned} \quad (21)$$

위에서  $x_s = (x_j, x_l)^T$ 는 비측정변수 ( $x_j$ )와 측정변수 ( $x_l$ )의 결합이며, 쌍  $[C_s; A_s]$ 는 가관측이며,  $\overline{A}_s \overline{x}_s = \sum_{k=1, k \neq j, l}^n A_k x_k$ 는 다른 부계통의 영향으로 여기에 포함된 모든 상태변수는 측정된다고 가정한다. UIO에 의해 제공된 상태추정치  $\hat{x}_j$ 는 측정치 대신 다른 부계통들의 FDO에 공급된다. 관측자가 고장  $f$ 에 대하여 둔감한 특성을 가지기 위해서는 부계통 구성시  $D_s = 0$ 이 되도록 변수를 선정하여 외란 및 고장의 영향을 원천적으로 배제하는 것이 가장 바람직하며, UIO는 이러한 선택이 불가능한 경우에 도입된다. 일반적인 UIO는 식(2)의 구조와 유사한 다음식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{z}_s &= P_s z_s + J_s u + G_s y_s + Q_s \overline{x}_s \\ \hat{x}_s &= L_{s1} z_s + L_{s2} y_s \end{aligned} \quad (22)$$

식(22)에서  $\lim_{t \rightarrow \infty} z_s = T_s x_s$ 이며,  $P_s$ 는 안정한 행렬로 선정하고, 각 파라미터들은 다음조건을 만족하도록 선택된다.

$$\begin{aligned} T_s A_s - P_s T_s &= G_s C_s, \quad J_s = T_s B_s, \quad L_{s1} T + L_{s2} C_s = I_n \\ Q_s &= T_s \overline{A}_s, \quad T_s D_s = 0 \end{aligned} \quad (23)$$

여기서  $n_s$ 는 UIO설계를 위해 구성된 부계통인 식(21)의 차

원이며, 본절의 모든 논의에서는  $n_s=2$ 라 가정한다. 기존 UIO의 존재조건은 다음과 같다[5].

- (i)  $rank(C_s D_s) = rank(D_s) = q_s \leq rank(C_s)$
- (ii) 쌍  $[C_s; T_s A_s]$ 가 가관측인 변환행렬  $T_s$ 가 존재할 것  
(단,  $T_s = (I_{n_s} - D_s(C_s D_s)^+ C_s)$ 가 흔히 사용됨)

식(21)에서  $C_s = (0 \ 1)$ 이므로  $D_s$ 가 영행렬이 아닌 한 위의 존재조건을 만족하는 경우는 없다. 따라서 위의 존재조건을 충족시키기 위해 벡터  $x_s$ 에 추가적인 측정변수를 포함시킬 수도 있으나, 이 경우에는 고장변수도 추가될 수 있으므로 존재 조건의 완화를 위한 근본적인 대책이 될 수 없다. 따라서 제안된 방법의 적용을 위해서는 존재조건이 더 부드러운 UIO가 채택되어야 한다. 본 절에서는 고장벡터 모델링 기법을 도입한 UIO를 제시한다. UIO설계과정의 단순화를 위하여 식(24), (25)를 도입한다.

$$\eta_i = \sum_{j=1}^q d_{ij} f_j, \quad i=j, l \quad (24)$$

$$D_s f = \overline{D}_s \eta, \quad \eta = [\eta_j \ \eta_l]^T \quad (25)$$

제안된 UIO의 설계과정은 다음과 같다.

- 1단계)  $[C_s; A_s]$ 의 가관측성이 보장되도록 식(21)의 부계통을 구성한다.
- 2단계) 기존의 고장데이터 등을 분석하여 고장 유형을 파악하고 그에 합당한 고장모델을 수립한다.
- 3단계) 고장모델을 식(21)의 부계통방정식에 병합하여 확장계통을 구성한다.
- 4단계) 확장계통에 대하여 고전적인 전차수(감소차수)관측기를 설계한다.

위 과정에 요구되는 고장모델링 및 고장진단관측자의 설계과정은 [13]에 소개되어 있다. 먼저 고장모델은 다음과 같다. 고장에 대한 충분한 데이터를 얻을 수 있는 경우에는 고장모델의 식별이 가능하지만, 고장데이터가 충분치 않은 일반적인 경우에는 계단함수, 램프함수 등을 포괄하는 식(26)의 Taylor 급수 표현을 고장모델로 선택할 수 있다.

$$\eta_i = \sum_{k=0}^{\delta-1} a_k t^k, \quad (\delta \geq 1), \quad i=j, l \quad (26)$$

이 경우 식(26)을 해로 가지는 고장모델은 다음과 같은 가관측표준형 동태방정식이다.

$$\dot{w}_i = E_{fi} w_i \quad (27a)$$

$$\eta_i = H_{fi} w_i \quad (27b)$$

여기서  $E_{fi} = \begin{bmatrix} 0 & I_{(\delta-1)} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{(\delta \times \delta)}, \quad H_{fi} = [1 \ 0 \ \dots \ 0]$

∈ ℝ<sup>(1×6)</sup>이다. 식(27)의 동태방정식은 비교적 느린 동특성을 갖는 외란, 프로세스고장, 센서고장에 대한 매우 유용한 모델이다. 다음으로 확장시스템의 구성은 식(21)과 식(27)을 결합하여 다음과 같이 얻어진다.

$$\dot{x}_{sa} = A_{sa}x_{sa} + \overline{A}_{sa} \overline{x}_{sa} + B_{sa}u \quad (28a)$$

$$y_s = C_{sa}x_{sa} \quad (28b)$$

위식에서  $x_{sa} = [x_s^T \ w^T]^T$  이며  $A_{sa} = \begin{bmatrix} A_s & \overline{D}_s H_f \\ 0 & E_f \end{bmatrix}$ ,  $\overline{A}_{sa} = \begin{bmatrix} \overline{A}_s \\ 0 \end{bmatrix}$ ,  $B_{sa} = \begin{bmatrix} B_s \\ 0 \end{bmatrix}$ ,  $C_{sa} = [C_s \ 0]$  이고,  $A_{sa}$ 내에서  $H_f = \text{diag}[H_{f1} \ H_{f2}]$ ,  $E_f = \text{diag}[E_{f1} \ E_{f2}]$  이다. 따라서 이 UIO는 쌍  $[C_{sa}; A_{sa}]$ 가 완전 가관측일 때 존재한다. 본 연구에 도입된 UIO는 식(28)에 대한 일반적인 전차원관측자로서 다음 식으로 표현된다.

$$\dot{\widehat{x}}_{sa} = (A_{sa} - L_{sa}C_{sa})\widehat{x}_{sa} + L_{sa}y_s + \overline{A}_{sa} \overline{x}_{sa} + B_{sa}u \quad (29)$$

위에서  $\widehat{x}_{sa} = [ \widehat{x}_s^T \ \widehat{w}^T ]^T$ 이므로 UIO는 비측정변수의 추정치( $\widehat{x}_{js}$ )와 고장의 추정치인  $\widehat{\eta}_j$  또는  $\widehat{\eta}_l$  를 동시에 제공한다.

(주) 특히  $\overline{D}_s^T = (1 \ 0)$ 인 경우 고장의 추정치  $\widehat{\eta}_j$ 는 j-번째 부계통의 고장검출에 직접 사용될 수 있으므로 이 경우에는 UIO가 FDO로 채택될 수도 있다.

#### 나. 잔차발생기구의 구성

식(29)의 UIO가 측정 불가능한 상호작용변수의 정확한 추정치( $\widehat{x}_{js}$ )를 제공하면,  $x_j$ 의 영향을 받는 부계통의 변수  $x_i$ 에 대한 잔차발생을 위한 식(12)의 FDO 방정식은 다음과 같이 수정된다.

$$\begin{aligned} \dot{\widehat{x}}_i &= (a_{ii} - l_i)\widehat{x}_i + l_i y_i + \sum_{k=1, k \neq j, i}^n a_{ik} x_k + a_{ij} \widehat{x}_{js} + \sum_{k=1}^m b_{ik} u_k \\ e_i &= x_i - \widehat{x}_i = y_i - \widehat{y}_i, \quad i=1, 2, \dots, j-1, j+1, \dots, n \end{aligned} \quad (30)$$

만일  $e_s = \widehat{x}_s - x_s$ 가 점근적으로 영에 수렴하면 식(30)에 대해서도 식(14) 및 식(15)의 관계가 성립된다. 또한  $x_j$ 가 상태변수인 부계통에 대한 FDO방정식은 다음과 같다.

$$\dot{\widehat{x}}_j = (a_{jj} - l_j)\widehat{x}_j + l_j \widehat{x}_{js} + \sum_{k=1, k \neq j}^n a_{jk} x_k + \sum_{k=1}^m b_{jk} u_k \quad (31)$$

이 FDO에서는 UIO에서 공급된  $\widehat{x}_{js}$ 가 추정출력의 역할을 하므로 식(32)의 추정편차를 정의할 수 있고, 편차방정식은 식(14)와 같다.

$$e_j = \widehat{x}_j - \widehat{x}_{js} \quad (32)$$

따라서 고장검출식별에 사용될 편차집합  $E_r$ 은 식(30)과 (32)로부터 얻어지며, 따라서 고장식별부의 설계과정은 경우1과 동일하다.

#### 4. 적용사례

제안된 잔차발생 알고리즘과 이를 이용한 고장검출식별시스템의 성능을 검토하기 위하여 다음의 파라미터를 가지는 4-탱크시스템을 고려한다[11,12].

$$A = m \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -2 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0.002 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

위 식에서  $m=21 \cdot 886^{-1}$ 이며, 상태변수는 각 탱크의 수위로서  $x_i = h_i$ ,  $i=1, 2, 3, 4$ 이고  $u=1m^3/hr$ 이다. 검출대상 고장은 각 탱크에서 발생하는 누수(leakage)로서  $f_i$ ,  $i=1, 2, 3$ 이며, 네 번째 탱크의 누수는 고려하지 않는다. 이 경우 고장 전달행렬(D)는 다음과 같다.

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

위의 경우 비측정변수  $x_3$ 가  $x_1$ -방정식을 제외한 모든 변수방정식에 개입되어 있다. 고장검출을 위한 잔차발생을 위해서는 비측정변수인  $x_3$ 의 추정치가 제공되어야 하며, 추정치  $\overline{x}_3$ 를 추정치 대신 투입함으로써 FDO를 설계할 수 있다. 모두 동일한 고유치(-5m)를 부여하여 고장의 영향을 받는 각 요소에 대한 1차의 FDO를 설계한 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\widehat{x}}_1 &= -5m\widehat{x}_1 + 4my_1 + my_2 + 0.002u \\ \dot{\widehat{x}}_2 &= -5m\widehat{x}_2 + my_1 + 3my_2 + m\overline{x}_3 \\ \dot{\widehat{x}}_3 &= -5m\widehat{x}_3 + my_2 + 3m\overline{x}_3 + my_3 \end{aligned} \quad (33)$$

고장검출과 식별을 위한 잔차는  $r_i = y_i - \widehat{x}_i$ ,  $i=1, 2$ 와  $r_3 = \overline{x}_3 - \widehat{x}_3$  이다.

이제 위의 FDO에  $\overline{x}_3$ 를 제공하기 위한 UIO의 설계를 위해  $x_s = (x_3 \ x_4)^T$ 로 선정하여 식(21)의 부계통을 구성한 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_s &= m \begin{bmatrix} -2 & 1 \\ 1 & -2 \end{bmatrix} x_s + m \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} y_2 + m \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \eta_3, \eta_3 = f_3 \\ y_s &= (0 \ 1) x_s \end{aligned} \quad (34)$$

식(34)는 기존 UIO의 존재조건을 만족하지 못한다. 제안된 UIO의 설계를 위해  $f_3$ 를 바이어스형 고장으로 모델화하여 확장계통을 구성하고 고유치가 (-3m, -4m, -5m)에 위치하도록 UIO를 설계한 결과는 다음과 같고, 추정결과는  $\overline{x_{sz}} = (\overline{x_3} \ \overline{x_4} \ \overline{w_3})^T$ ,  $\overline{f_3} = \overline{w_3}$ 이다.

$$\dot{\overline{x_{sz}}} = m \begin{bmatrix} -2 & -27 & 1 \\ 1 & -10 & 0 \\ 0 & -60 & 0 \end{bmatrix} \overline{x_{sz}} + m \begin{bmatrix} 28 \\ 8 \\ 60 \end{bmatrix} y_3 + m \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} y_2 \quad (35)$$

시뮬레이션을 위해 고장크기를 아래와 같이 설정하였다.

$$f = [-0.078 \ -0.068 \ -0.0556]^T$$

그림1은 단일 고장에 대한 시뮬레이션 결과로서 (a), (b) 및 (c)는 각각 고장 1, 2, 3이 발생한 경우 식(10)의 성질을 가진 잔차가 발생함을 확인시켜준다. 그림2는 다중고장이 발생한 경우의 시뮬레이션 결과이다. (a)는 고장 1, 2가 발생한 경우 잔차  $r_1, r_2$ 가 영이 아닌 값을 가짐을 보여주며 (b), (c)는 각각 고장 1, 3이 발생한 경우 및 고장2, 3이 발생한 경우의 잔차응답으로, 다중 고장의 정확한 식별이 가능함을 보여준다.

### 6. 결 론

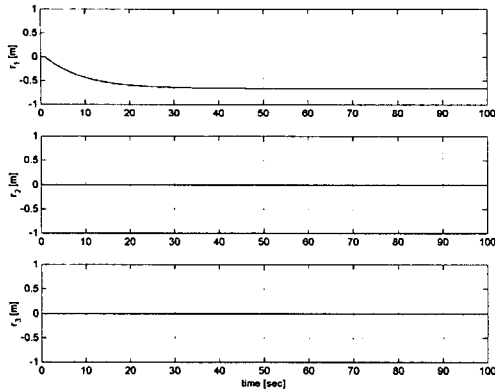
본 논문에서는 선형시스템의 프로세스 고장검출식별을 위한 새로운 잔차발생알고리즘을 제시하고 그 유용성을 검토하였다. 제안된 잔차발생알고리즘은 여러개의 상태관측자를 병렬로 도입한 기존의 다중관측자 기법과 동일한 식별 정보를 제공하면서도 매우 낮은 차원의 동태방정식으로 설계된다. 제안된 잔차발생알고리즘의 중요한 특징의 하나는 고장모델에 근거한 미지입력관측자를 도입하여 측정 불가능한 변수가 존재하는 경우에도 적용이 가능할 뿐 만 아니라, 모든 변수를 측정된 경우와 동일한 고장식별논리에 의한 고장식별이 가능하도록 설계될 수 있다는 점이다. 4-탱크시스템을 대상으로 제안된 잔차발생기를 도입한 고장검출식별시스템을 설계하고 고장 시뮬레이션을 수행함으로써 제안된 기법의 실질적 적용 가능성을 입증하였다.

### 감사의 글

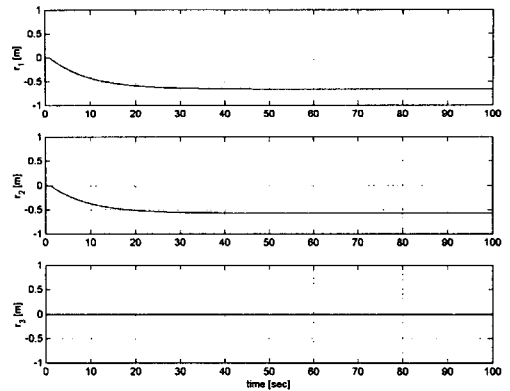
본 연구는 2003 학년도 단국대학교 대학연구비 지원으로 연구되었습니다.

### 참 고 문 헌

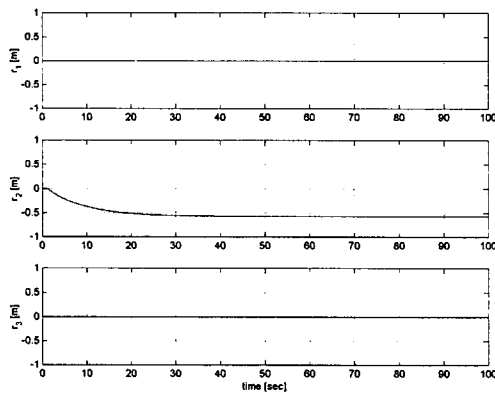
- [1] R. Isermann, "Supervision, fault-detection and fault-diagnosis methods - An introduction", Control Eng. Practice, Vol. 5, No. 5, pp. 639-652, 1997.
- [2] R. Isermann, "Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing - tutorial paper", Automatica, Vol. 29, No. 4, pp. 815-835, 1993.
- [3] R. N. Clark, "State estimation schemes for instrument fault detection", in Fault Diagnosis in Dynamic Systems, edited by R. Patton, P. M. Frank and R. N. Clark, Prentice-Hall, 1989.
- [4] P. M. Frank, "On-line fault detection in uncertain nonlinear systems using diagnostic observers: A survey", Int. J. of System Science, Vol. 25, No. 12, pp. 2129-2154, 1994.
- [5] M. Hou and P. C. Muller, "Fault detection and isolation observers", Int. J. of Control, Vol. 60, No. 5, pp. 827-846, 1994.
- [6] P. M. Frank, "Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge based redundancy: A survey and some new results", Automatica, Vol. 26, No., pp. 459-474, 1990.
- [7] J. Park and G. Rizzoni, "An eigenstructure assignment algorithm for the design of fault detection filters", IEEE Trans. Automatic Control, Vol. 39, No. 7, pp. 1521-1524, 1994.
- [8] W. H. Chung and J. L. Speyer, "A game theoretic fault detection filter", IEEE Trans. Automatic Control, Vol. 43, No. 2, pp. 143-161, 1998.
- [9] R. Patton, P. M. Frank and R. N. Clark, Fault diagnosis in dynamic systems, Theory and Applications, Prentice-Hall, 1989.
- [10] R. Seliger and P. M. Frank, "Robust residual evaluation by threshold selection and a performance index for nonlinear observer based fault diagnosis", Proc. of Int. Conf. on Fault Diagnosis, Toulouse, April, 1993.
- [11] W. Ge and C. C. Fang, "Detection of faulty components via robust observation", Int. J. of Control, Vol. 47, No. 2, pp. 581-599, 1988.
- [12] D. Koenig, S. Nowakowski and A. Bourjij, "New design of robust observers for fault detection and isolation", Proc. of the 35th Conference on Decision and Control, Kobe, Japan, pp. 1464-1467, Dec. 1996.
- [13] K. S. Lee and T. G. Park, "A fault diagnostic observer design by hybrid disturbance decoupling approach", Trans. of KIEE, Vol. 46, No. 11, pp. 1647-1652, 1997.



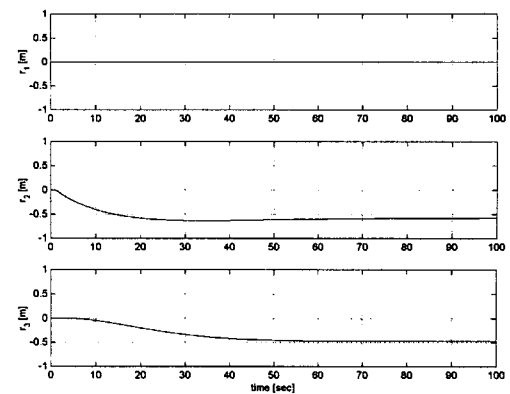
(a) 고장 1 (fault 1)



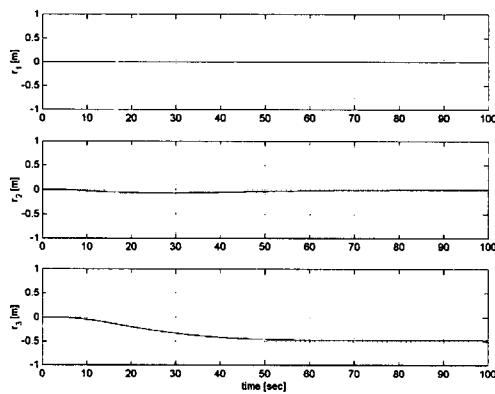
(a) 고장 1, 2 (fault 1 and 2)



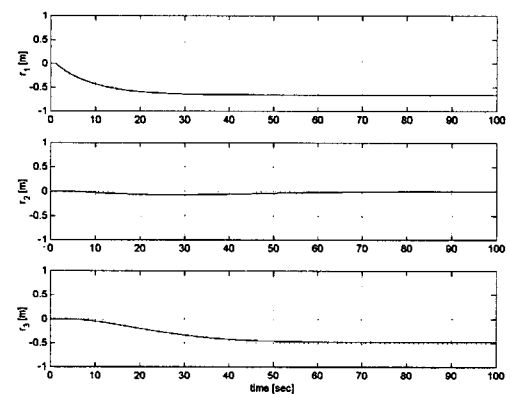
(b) 고장 2 (fault 2)



(b) 고장 2, 3 (fault 2 and 3)



(c) 고장 3 (fault 3)



(c) 고장 3, 1 (fault 1 and 3)

그림 1 단일고장이 발생한 경우의 잔차  
Fig. 1 Generated residuals for single fault

그림 2 동시 고장이 발생한 경우의 잔차  
Fig. 2 Generated residuals for simultaneous faults

저 자 소 개



**이 기 상(李 起 常)**

1952년 10월 24일생. 1978년 고려대 전기공학과 졸업(학사). 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1983년~현재 단국대 전기전자컴퓨터공학부 교수. 1995년~1996년 Univ. of Washington 방문교수.

Tel : 02) 709-2575, Fax : 02) 795-8771

E-mail : keesang@dku.edu



**이 상 문(李 相 汶)**

1967년 11월 14일생. 1992년 단국대 전기공학과 졸업(학사). 2003년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 02) 709-2581

Fax : 02) 795-8771