

공정고장 검출식별시스템을 위한 잔차발생기

이기상* · 박태건* · 이상문*
 단국대 전기공학과* · 충북과학대 전자정보과*

A new residual generator for a process FDIS

Kee-Sang Lee* · Tae-Geon Park* · and Sang-Moon Lee*
 Dankook Univ.* · Chungbuk Provincial Univ. of S&T*

Abstract - A new residual generation scheme that can be employed in the process fault detection and isolation systems for linear (control) systems is suggested. The scheme is very simple, but provides the same information for the detection and isolation of the anticipated faults as the conventional multiple observer based schemes. Application results show the practical feasibility of the proposed scheme.

1. 서 론

공정모델에 근거한 고장검출기법에 대한 최근의 연구는 주로 관측자기법에 집중되어왔다 [1]. 관측자기법은 다중 관측자기법 [2,3]과 검출필터기법 [4,5]으로 분류된다. 검출필터기법은 일반적으로 고장검출과 식별을 한 개의 필터에 의해 수행할 수 있다는 장점이 있지만 고유치-고유벡터 배치기법에 의해 설계되므로 설계조건이 까다롭다. 다중관측자 기법은 잔차발생을 위한 관측자 설계조건이 비교적 까다롭지 않으며 고장정보의 획득과 보상기능을 갖도록 설계할 수 있다는 관점에서 고장검출필터에 비해 유리하며, 비선형시스템에의 확장이 비교적 용이하여 많은 연구가 진행되고 있다 [2]. 다중 관측자기법의 문제점은 잘 알려진 바와 같이 여러개의 관측자를 병렬적으로 구동해야하므로 실시간 적용이 어렵다는 점이다. 본 논문의 목적은 다중관측자기법과 동일한 정보를 제공하면서도 매우 단순한 잔차발생알고리즘을 제시하고 그 유용성을 검토함에 있다. 제안된 잔차발생기구는 시스템 분해(decomposition)에 근거하여 설계되는 분산관측기 구조를 가지며, 매우 낮은 차원의 동태방정식으로 설계된다. 특히 외란의 영향이 적어 잔차발생기 설계시 그 영향을 고려할 필요가 없는 경우에는 전체 잔차발생기 차수의 합이 시스템 상태벡터의 차원보다 적다. 제안된 잔차발생기구의 중요한 특징은 비측정변수가 존재하는 경우에도 모든 변수를 측정할 경우와 동일한 구조적 잔차(structured residual)의 발생이 가능하다는 점이다. 이 경우 제안된 잔차발생기구는 미지입력 및 관심없는 고장에 대해 둔감한 특성을 가지는 일종의 미지입력관측자(unknown input observer: UIO)로서 고장진단 관측자(fault diagnostic observer: FDO)로 분류된다.

2. 잔차발생 문제

식(1)의 선형 시불변계통을 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, D 는 (n,n) , (n,m) , (n,r) 및 (n,q) 차원의 행렬이다. 또한 행렬 C 는 (n,p) 차원의 출력행렬이다. 고장검출식별시스템(fault detection isolation system: FDIS)을 위한 잔차발생장치에 요구되는 전제 조건은 발생되는 잔차에 대한 임계치 검사 및 논리적 연산을 수행함으로써 고장의 검

출과 식별이 가능해야 한다는 점이다. 현재 가장 많이 연구된 잔차발생장치는 식(2)의 관측자 구조를 가진다 [1].

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= Pz(t) + Ju(t) + Gy(t) \\ r(t) &= L_1 z(t) + L_2 y(t) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $z(t)$ 는 관측자의 상태벡터로서 일반적으로 시스템의 차원인 n 과 같거나 작은 차원을 가진다. 이 관측자는 정상상태에서 $z(t) = Tx(t)$ 를 만족하도록 설계되며, $r(t)$ 는 관측자 출력으로 본 논문에서는 잔차에 해당된다. 행렬 P 의 모든 고유치가 부의 실수부를 가지고, 파라미터 T, J, L_1, L_2 가 식(3)를 만족하도록 결정되면 식(4)의 오차방정식이 얻어진다.

$$TA - PT = GC, J = TB, L_1 T + L_2 C = 0, TE = 0 \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = P\varepsilon(t) - TDf(t) \quad (4)$$

$$r(t) = L_1 \varepsilon(t)$$

위에서 $\varepsilon(t) = z(t) - Tx(t)$ 이다. 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.

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

식(2)와 같은 관측자형 잔차발생기를 도입한 고장검출식별기법(FDIS)의 대표적 예로는 GOS(generalized observer scheme)을 들 수 있으며 그 설계개념은 아래와 같다 [1]. 다음의 q 차원 고장벡터를 고려한다.

$$f = [f_1 \ f_2 \ \dots \ f_q]^T \quad (5)$$

[경우1] 단일고장의 검출식별을 위한 GOS형 FDIS에서, 각 관측자는 잔차가 식(6)의 특성을 가지도록 설계한다.

$$\begin{aligned} r_1(t) &= \text{UIO}_1(f_2, f_3, \dots, f_q) \\ r_2(t) &= \text{UIO}_2(f_1, f_3, \dots, f_q) \\ &\vdots \\ r_q(t) &= \text{UIO}_q(f_1, f_2, \dots, f_{q-1}) \end{aligned} \quad (6)$$

위의 잔차를 이용한 고장식별논리는 매우 단순하다. 즉,

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

식(6)의 잔차발생을 위한 UIO는 존재 조건이 비교적 부드럽지만, 다중 고장이 발생한 경우 고장 식별이 불가능하다.

[경우2] 다중고장 발생시 q 개의 고장을 식별하기 위해서는 오직 한 개의 고장에 의해서만 영향을 받는 잔차를 발생시켜야 한다.

$$\begin{aligned} r_1(t) &= \text{UIO}_1(f_1) \\ r_2(t) &= \text{UIO}_2(f_2) \\ &\vdots \\ r_q(t) &= \text{UIO}_q(f_q) \end{aligned} \quad (7)$$

이 경우 고장의 검출식별논리는 다음과 같다.

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

이 잔차집합은 고장식별의 관점에서 매우 유용하지만 UIO의 존재 조건은 매우 까다롭다. 따라서 실제적인 잔차발생기구는 식(6)과 식(7)을 절충한 상태에서 UIO설계의 단순성과 식별성을 고려하여 설계된다. GOS를 위한 UIO는 많은 경우 n 차원 동태방정식이며 q 개의 관측자가 병렬적으로 구동되므로, 이를 도입한 FDIS의 실시간 적용은 곤란하다. 따라서 동일한 정보를 제공하면서 단순한 잔차발생알고리즘의 제안은 다중관측자기법의 실질적 적용을 위해 매우 중요한 과제로 인식되고 있다 [3,4,6,7].

3. 제안된 잔차발생기구

본 절에서는 기존 다중관측자기법의 문제점을 해결해 줄 수 있는 잔차발생기구로서 매우 단순한 고장진단관측자를 제안한다. 제안의 초점은 각 부계통에 유입되는 상태변수의 결합을 (기지의) 외부입력으로 취급함으로써 각 FDO의 차수감소와 함께 검증논리를 단순화한다는 점이다. 제안된 잔차발생기구의 설계과정은 (i) 계통의 출력행렬 $C = I_n$ 으로 모든 상태변수가 측정되는 경우와 (ii) 측정불가능한 상태변수가 존재하는 경우로 나누어 기술된다. 여기서 참고문헌 [1,3,6,7]에 기술된 방법을 도입함으로써 잔차에서 외란의 영향을 최소화할 수 있으나 전개의 편의상 외란전달행렬 $E = 0$ 으로 가정한다.

3.1 모든 상태변수가 측정되는 경우

이 경우에는 식(1)의 계통은 식(8)와 같이 한 개의 상태변수를 갖는 n 개의 부계통으로 분할할 수 있다. 이 경우, 각 부계통은 상태변수가 측정 출력이므로 항상 가관측 조건을 만족한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= a_{ii}x_i + \sum_{k=1, k \neq i}^n a_{ik}x_k + \sum_{j=1}^m b_{ij}u_j + \sum_{p=1}^q d_{ip}f_p \\ y_i &= x_i, \quad i=1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (8)$$

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

$$\begin{aligned} \hat{\dot{x}}_i &= g_i \hat{x}_i + l_i y_i + \sum_{k=1, k \neq i}^n a_{ik} \hat{x}_k + \sum_{j=1}^m b_{ij} u_j \\ \hat{y}_i &= \hat{x}_i, \quad i=1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 $g_i = (a_{ii} - l_i)$ 이며 측정출력과 추정출력간의 오차:

$$e_i = y_i - \hat{y}_i = x_i - \hat{x}_i \quad (10)$$

으로 정의되며 식(11)의 방정식에 의해 지배된다.

$$\dot{e}_i = g_i e_i + \sum_{p=1}^q d_{ip} f_p \quad (11)$$

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

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

오차의 수렴속도는 각 FDO의 이득 l_i 에 의해 조정된다. 고장의 발생은 식(9)와 식(10)에 의해 얻어진 오차집합 $E_r = [e_1, e_2, \dots, e_n]^T$ 에 대한 임계치 검사에 의해 검출될 수 있으나 고장의 식별을 위해서는 고장전달행렬 D 와 E_r 에 근거하여 정의된 식(12)의 잔차를 도입하는 것이 바람직하다.

$$r = WE_r \quad (12)$$

3.2 비측정변수가 존재하는 경우

식(8)의 상태방정식에서 x_j 가 비측정변수이면 이 변수만을 가진 부계통에 대한 FDO 설계가 불가능하다. 이 경우의 해결방법은 비측정변수를 측정변수와 결합하여 가관측조건을 만족하는 부계통을 구성하고 모든 미지입력과 고장에 대하여 둔감한 특성을 가진 UIO를 설계하여 그 추정결과를 측정치 대신 이용하는 것이다.

3.2.1 비측정변수의 추정을 위한 미지입력관측자

제안하는 UIO는 비측정변수의 추정치를 제공하기 위한 목적으로 설계되는 것이므로 모든 미지입력과 고장에 대하여 둔감한 특성을 가지도록 설계되어야 한다. 본절에서는 단지 두 개의 변수만이 포함된 가장 단순한 구조를 가정한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_s &= A_s x_s + \overline{A}_s \overline{x}_s + B_s u + D f \\ y_s &= C_s x_s \end{aligned} \quad (13)$$

위에서 $x_s = [x_j, x_i]^T$ 는 비측정변수(x_j)와 측정변수(x_i)의

결합이며, 쌍 (C_s, A_s) 는 가관측이다. $\overline{A}_s \overline{x}_s = \sum_{k=1, k \neq j, k \neq i}^n A_{sk} x_k$ 는 다른 부계통의 영향으로 여기에 포함된 모든 상태변수는 측정된다고 가정한다. 본 논문에서는 비측정변수(x_j)를 UIO를 이용하여 추정하고 그 상태추정치 \hat{x}_j 는 측정치 대신 다른 부계통들의 FDO에 공급된다. 관측자가 고장 f 에 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. 현재까지 가장 많이 연구된 UIO는 식(2)의 구조와 동일한 다음 식으로 표현된다

$$\begin{aligned} \dot{z}_s(t) &= P_s z_s(t) + J_s u(t) + G_s y_s(t) + Q_s \overline{x}_s \\ \hat{x}_s(t) &= L_s z_s(t) + L_{\mathcal{Q}} y_s(t) \end{aligned}$$

위에서 $z_s = T_s x_s$ 이며, P_s 는 안정한 행렬로 선정하고, 각 파라미터들은 다음조건을 만족하도록 선택된다.

$$\begin{aligned} T_s A_s - P_s T_s &= G_s C_s, \quad J_s = T_s B_s, \quad L_s T + L_{\mathcal{Q}} C_s = I_n \\ Q_s &= T_s \overline{A}_s, \quad T_s D_s = 0 \end{aligned}$$

위식에서 n_s 는 부계통의 차원이며 본절의 모든 논의에서는 $n_s = 2$ 라 가정한다. UIO의 존재조건은 다음과 같다[5].

(i) $\text{rank}(C_s D_s) = \text{rank}(D_s)$

(ii) 쌍 $(C_s, T_s A_s)$ 가 가관측인 변환행렬 T_s 가 존재할 것 위의 UIO의 존재조건 (i)에서 변환행렬로는 $T_s = (I_{n_s} - D_s(C_s D_s)^+ C_s)$ 가 흔히 사용되며, 식(13)에서 $C_s = [0 \ 1]$ 이므로 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 존재조건의 완화를 위한 근본적인 대책이 될 수 없다. 따라서 제안된 방법의 적용을 위해서는 보다 완화된 존재조건을 갖는 UIO가 채택되어야 한다. 본절에서는 고장벡터모델링기법을 도입한 UIO를 제시한다. UIO설계과정의 단순화를 위하여 식(14)와 식(15)를 정의한다.

$$\eta_j = \sum_{p=1}^q d_{jp} f_p, \quad \eta_i = \sum_{p=1}^q d_{ip} f_p, \quad \overline{D}_s \eta = [\eta_j, \eta_i]^T \quad (14)$$

$$D_s f = \overline{D}_s \eta \quad (15)$$

제안된 UIO의 설계과정은 고장모델을 수렴, 고장모델과 부계통방정식에 병합, 확장계통에 대한 관측기 설계 순으로 진행된다. 먼저 고장모델 [7]은 다음과 같다.

$$\dot{w} = E_f w \quad (16a)$$

$$\eta = H_f w \quad (16b)$$

확장계통의 구성은 식(13)와 식(16)을 결합하여 다음과 같이 얻어진다.

$$\dot{x}_{sa} = A_{sa} x_{sa} + \overline{A}_{sa} \overline{x}_{sa} + B_{sa} u \quad (17a)$$

$$y_s = C_{sa} x_{sa} \quad (17b)$$

여기서 $x_{sa} = [x_s^T \ w^T]^T$, $A_{sa} = \begin{bmatrix} A_s & \overline{D}_s H_f \\ 0 & E_f \end{bmatrix}$, $\overline{A}_{sa} = \begin{bmatrix} \overline{A}_s \\ 0 \end{bmatrix}$,

$B_{sa} = \begin{bmatrix} B_s \\ 0 \end{bmatrix}$, $C_{sa} = [C_s \ 0]$ 이다. 주의할 사항은 식(16)의 고장모델이 가관측표준형이므로 식(13)의 부계통이 가관

측이면 식(17)의 가관측성도 보장된다는 점이다. 따라서 UIO는 식(17)에 대한 일반적인 관측자와 동일하며 다음 식으로 표현된다.

$$\hat{x}_{sa} = (A_{sa} - L_{sa}C_{sa})\hat{x}_{sa} + L_{sa}y_s + \overline{A_{sa}}\overline{x_{sa}} + B_{sa}u \quad (18)$$

위에서 $\hat{x}_{sa} = [\hat{x}_s^T \hat{w}^T]^T$ 이므로 UIO는 비측정변수의 추정치(\hat{x}_s)와 고장의 추정치인 \hat{w} , 또는 \hat{w}_i 를 동시에 제공한다.

3.2.2 잔차발생기구의 구성

식(18)의 UIO가 비측정 상호작용변수의 추정치(\hat{x}_s)를 제공하면, x_j 의 영향을 받는 부계통에 대한 FDO 방정식은 다음과 같이 수정된다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_i &= (a_{ii} - l_i)\hat{x}_i + l_i y_i + \sum_{k=1, k \neq j}^m a_{ik} x_k + a_{ij} \hat{x}_j + \sum_{k=1}^m b_{ik} u_k \quad (19) \\ e_i &= x_i - \hat{x}_i = y_i - \hat{y}_i, \quad i=1, 2, \dots, j-1, j+1, \dots, n \end{aligned}$$

이제 x_j 를 포함한 부계통에 대한 FDO는 다음과 같고,

$$\dot{\hat{x}}_j = (a_{jj} - l_j)\hat{x}_j + l_j y_j + \sum_{k=1, k \neq j}^m a_{jk} x_k + \sum_{k=1}^m b_{jk} u_k \quad (20)$$

이 FDO에서는 UIO에서 공급된 \hat{x}_j 가 측정출력의 역할을 하므로 식(21)의 추정편차를 정의할 수 있고, 편차방정식은 식(11)과 같다.

$$e_j = \hat{x}_j - \hat{x}_j \quad (21)$$

고장검출식별에 사용될 편차집합 E_j 은 식(19)와 식(21)로부터 얻어진다.

4. 적용 사례

다음의 파라미터를 가지는 4-탱크시스템을 고려한다.[6]

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

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

위식에서 $m = 21 \cdot 886^{-1}$ 이며, $u = 1m^3/hr$ 이다. 상태변수는 각 탱크의 수위로서 $x_i = h_i$, $i=1, 2, 3, 4$ 이고 검출대상 고장은 각 탱크의 누수(leakage)로 설정하였으며, 비측정 변수 x_3 가 x_1 -방정식을 제외한 모든 변수방정식에 개입되어 있다. 비측정변수 x_3 의 추정치 \hat{x}_{3s} 를 측정치 $\overline{x}_{3s} = y_{3s}$ 로 간주하여 투입하고, 동일한 고유치(-5m)을 부여하여 각요소에 대한 FDO를 설계한 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_1 &= -5m\hat{x}_1 + 4my_1 + my_2 + 0.002u \\ \dot{\hat{x}}_2 &= -5m\hat{x}_2 + my_1 + 3my_2 + m\overline{x}_{3s} \\ \dot{\hat{x}}_3 &= -5m\hat{x}_3 + my_2 + 3m\overline{x}_{3s} + my_3 \end{aligned}$$

잔차는 $r_i = y_i - \hat{x}_i$, $i=1, 2$ 와 $r_3 = \overline{x}_{3s} - \hat{x}_3$ 이다. 위의 FDO에 \overline{x}_{3s} 를 제공하기 위해 $x_s = [x_3 \ x_4]^T$ 로 선정하고 f_3 를 바이어스형 고장으로 모델화한 다음, 고유치가 (-3m, -4m, -5m)에 위치하도록 UIO를 설계한 결과는 다음과 같다.

$$\hat{x}_{sa} = m \begin{bmatrix} -2 & -27 & 1 \\ 1 & -10 & 0 \\ 0 & -60 & 0 \end{bmatrix} \hat{x}_{sa} + m \begin{bmatrix} 28 \\ 8 \\ 60 \end{bmatrix} y_3 + m \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} y_2$$

$$\hat{x}_{sa} = [\hat{x}_{3s} \ \hat{x}_s \ \hat{w}]^T, \quad \overline{x}_{3s} = \hat{x}_{3s}$$

시뮬레이션을 위해 고장크기를 아래와 같이 설정하였다.

$$f = [f_1 \ f_2 \ f_3]^T = [-0.078 \ -0.068 \ -0.0556]^T$$

그림1은 고장1(f_1)에 대한 잔차이며, 그림2는 고장2(f_2)와 고장3(f_3)이 동시에 발생한 경우의 잔차응답으로 단일고장 및 다중고장의 식별이 가능한 잔차가 발생됨을 보여준다.

5. 결 론

본 논문에서는 선형시스템의 프로세스 고장검출식별을 위한 새로운 잔차발생알고리즘을 제시하고 그 유용성을 검토하였다. 기존의 FDO와 제안된 잔차발생알고리즘 중요한 차이점은 고장모델에 근거한 UIO를 도입하여 측정불가능한 변수가 존재하는 경우에도 모든 변수를 측정할 수 있는 경우와 동일한 고장식별논리에 의한 고장식별이 가능하도록 설계될 수 있다는 점이다. 적용 결과는 제안된 잔차발생기법의 실질적 적용이 가능함을 보여준다.

[참 고 문 헌]

- [1] R. Patton, P. M. Frank and R. N. Clark, Fault diagnosis in dynamic systems, Theory and Application, Prentice-Hall, 1989.
- [2] P. M. Frank, "On-line fault detection in uncertain nonlinear systems using diagnostic observers: A survey", International Journal of System Science, 1994, Vol.25, No.12, pp.2129-2154.
- [3] M.Hou and P.C.Muller, "Fault detection and isolation observers," International Journal of Control, Vol.60, No.5, 1994, pp.827-846.
- [4] Park, J., Rizzoni, G., "An Eigenstructure Assignment Algorithm for the Design of Fault Detection Filters", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 39, No. 7, pp 1521-1524, 1994
- [5] Chung, W. H., Speyer, J. L., "A Game Theoretic Fault Detection Filter", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 43 No. 2, pp. 143-161, 1998
- [6] Wei Ge and C.C.Fang, "Detectin of faulty components via robust observation," International Journal of Control, Vol.47, No.2, 1988, pp.581-599.
- [7] K. S. Lee and T. G. Park, "A fault diagnostic observer design by hybrid disturbance decoupling approach," Transactions of KIEE, Vol.46, No.11, 1997, pp.1647-1652.

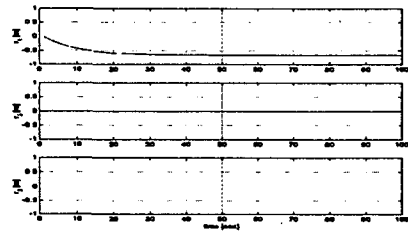


그림1. 고장1 발생이 발생한 경우의 잔차

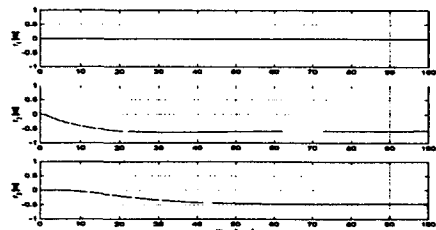


그림2. 고장2, 3이 동시에 발생한 경우의 잔차