

PWR 가압기의 계측장치 고장 진단에 관한 연구

A Study of Instrument Failure Detection in PWR Pressurizer

千 熙 英* · 朴 貴 泰** · 朴 勝 燁*** · 金 仁 誠§
 (Hee-Young Chun · Gwi-Tae Park · Seung-Yub Park · In-Sung Kim)

ABSTRACT

The identification problem of instrument faults in PWR pressurizer is considered. The instrument failure detection technique in this paper consists of two filters, a normal-mode Kalman filter which estimates plant states in normal operation and a bias estimator which estimates the magnitudes and directions of bias faults. The concept of threshold based on the residual of a Kalman filter in normal operation is introduced. The bias estimator is driven when the absolute value of residual exceeds the threshold. The suggested failure detection algorithm is applied to a PWR pressurizer. Computer simulations show that the prompt detection of bias fault can be performed very successfully when there exist instrument faults.

1. 서 론

원자력 발전소에서는 원자로 계통의 상태를 감시하고 제어하기 위해 각종 계측 장치를 설치하여 이 계측 장치의 출력에 의한 정보를 사용하게 되는데 만일 계측 장치에 고장이 발생하여 허위 정보를 제공하고 이 정보에 의해 제어를 수행한다면 원자로 계통은 사고에 직면할 우려가 있다. 그러므로 현재 원자력 발전소에서는 계측 장치를 다중으로 설치해서 고장난 계측 장치를 감시하거나 더욱 일반적인 방법으로는 계통의 동특성과 동작 상태에 관한 운전원(operator)의 지식에 의존하여 어떤 계측 장치에 고장이 발생하였는지 결정하고 있다. 그러나 원자력 발전소는 계측하여야 할 수많은 값이 있고 그 계측 값마다 중복 설치 되는 계측 장치는 상당히 고

가이며 설치 중량, 장소 등을 고려하여야 한다. 또한 계측 장치에서 발생할 수 있는 다양한 고장 양상에 대해 운전원이 계속적으로 계측 장치를 감시하는 것은 불가능하다. 따라서 계측 장치의 고장을 감시하고 고장난 계측 장치를 찾는 방법의 개선이 필요하다. 그러므로 컴퓨터에 의한 고장 검출 기법이 상당히 연구되어 왔다.^{1)~8)}

원자로 계통중에서도 가압기(pressurizer)의 계측 장치 고장 진단에 대해 많은 연구 결과가 보고되었는데 이는 가압기가 PWR 발전소에서 필수적인 부분이며 가압기 계측 장치는 항상 신뢰할 만한 정확도를 유지하여야 하기 때문이다. 현재 가압기의 계측 장치에 적용된 고장 진단 기법으로는 DO-S(dedicated observer scheme)^{3)~6)}와 GLR(generalized likelihood ratio) 기법^{7), 8)}이 있다. DOS는 계측 장치의 계측치에 의해 구동되는 관측자(observer) 혹은 Kalman필터를 사용하여 다중 설치된 계측 장치와 같은 수의 상태 추정치를 구동시켜야 하므로 계산 시간이 상당히 큰 단점을 안고 있다. 이에 대해 GLR기법은 정상 상태시 구동되는 Kalman 필터와 고장을 감지하고 크기를 추정할 수 있는 필터로 구성되어 있다. 이 기법은 성능이 대단히 우수

* 正 會 員 : 高麗大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
 ** 正 會 員 : 高麗大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博
 *** 正 會 員 : 高麗大 工大 電氣工學科 博士課程 修了
 § 正 會 員 : 高麗大 工大 電氣工學科 碩士課程
 接受日字 : 1987年 6月 23日
 1次修正 : 1987年 8月 1日

한 것으로 평가되어 있으나 고장 검출을 위해 설정된 창의 크기(window size)만큼 시간 지연이 생기며 계산량이 크고 각 계측 장치의 고장 양상(스텝, 점프, 램프)에 대한 정보가 미리 가정되어 있어야 한다는 단점을 갖고 있다.

본 연구에서는 이와 같은 단점을 피하기 위해 Friedland의 SBE(separate bias estimation)기법^{9, 10}을 도입한 고장 진단 방법을 제시하였다. SBE 기법을 고장 진단에 적용하기 위해 Kalman 필터의 편차(residual)에 대한 한계 영역 조사를 행하여 고장 발생 순간에 고장을 신속히 감지하고 고장난 성분 에 대한 bias 추정기를 동작시키므로써 계산 시간을 단축할 수 있도록 하였다.

본 연구에서 제시된 고장 진단 기법을 가압기의 계측 장치에 적용하여 계측 장치의 고장 발생시 고장 위치와 고장 크기를 진단하므로써 원자로 계통의 안전성을 증진시키는데 그 목적이 있다.

2. 가압기(Pressurizer) 모델

가압기는 원자로 운전시 원자로 냉각재 계통의 압력을 일정하게 유지하는 역할을 하며 냉각재의 2상 혼합물로 채워져 있는 큰 용기이다. 그림. 1은 전형적인 가압기의 구조를 나타낸다.

가압기의 수학적 모델은 Tylee의 연구⁹에 의하였다. 가압기내의 혼합물에 대해 질량과 에너지 평형 법칙을 적용하면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$\frac{dM_p}{dt} = W_{sur} + W_{sp} - W_{rv} \quad (2.1)$$

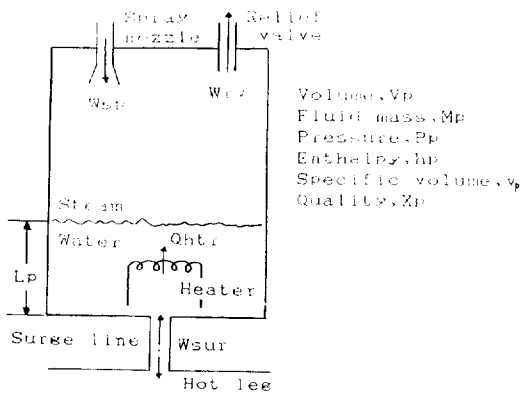


그림 1. 가압기 모델
Fig.1. Pressurizer model.

$$\frac{d(M_p h_p)}{dt} = \frac{V_p}{J} \frac{dP_p}{dt} + Q_{htr} + W_{sur} \cdot h_f + W_{sp} \cdot h_{ap} - W_{rv} \cdot h_g \quad (2.2)$$

여기서 J는 단위의 변환 계수, h_f 는 포화수 엔탈피, h_g 는 포화 증기 엔탈피, h_{sp} 는 가압기 분사수의 엔탈피를 나타내며 다른 변수는 그림. 1에 정의하였다. 가압기 모델의 상태 변수는 압력 P_p 와 혼합물의 혼합도 X_p 로 잡았다. 상태 변수에 대한 식은 다음 식에 의해 얻을 수 있다.

$$V_p = V_p / M_p = V_f + X_p (V_g - V_f) \quad (2.3)$$

$$h_p = h_f + X_p (h_g - h_f) \quad (2.4)$$

여기서 V_f , V_g 는 포화수와 포화 증기의 비체적이다.

식(2.3)과 (2.4)를 식(2.1)과(2.2)에 대입하여 dP_p/dt 와 dX_p/dt 에 대해 풀면 다음과 같은 상태 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dP_p}{dt} = \frac{-v_p}{V_p \Lambda} \left\{ v_p \frac{\partial h_p}{\partial X_p} (W_{sur} + W_{sp} - W_{rv}) + \frac{\partial v_p}{\partial X_p} [Q_{htr} + W_{sur} (h_f - h_g) + W_{sp} (h_{sp} - h_p) - W_{rv} (h_g - h_f)] \right\} \quad (2.5)$$

$$\frac{dX_p}{dt} = \frac{v_p}{V_p \Lambda} \left\{ v_p (W_{sur} + W_{sp} - W_{rv}) \left[\frac{\partial h_p}{\partial P_p} - \frac{v_p}{J} \right] + \frac{\partial v_p}{\partial P_p} [Q_{htr} + W_{sur} (h_f - h_p) + W_{sp} (h_{sp} - h_p) - W_{rv} (h_g - h_p)] \right\} \quad (2.6)$$

여기서

$$\Lambda = \frac{\partial v_p}{\partial P_p} \frac{\partial v_p}{\partial X_p} - \frac{\partial v_p}{\partial X_p} \left[\frac{\partial h_p}{\partial P_p} - \frac{v_p}{J} \right]$$

온도 계측 장치는 시간 지연이 있으므로 가압기 유체 혼합물의 온도 지시치 T_i 도 상태 변수에 포함시킨다.

$$\frac{d}{dt} T_i = \frac{1}{\tau_p} (T_a - T_i) \quad (2.7)$$

여기서 T_a 는 유체 혼합물의 실제 온도, τ_p 는 thermo-well의 시정수(20s)이다. T_a 는 포화 압력(22 50 psi) 근처에서 증기표(steam table)를 이용하여 다음과 같은 선형 근사화한 식을 얻을 수 있다.

$$T_a = 0.0639 P_p - 509.033 \quad (2.8)$$

그러므로 식(2.7)와 (2.8)에 의해

$$\frac{d}{dt} T_i = (3.1925 \times 10^{-3}) P_p - 0.05 T_i + 25.542 \quad (2.9)$$

식(2.5), (2.6), (2.9)를 정상 동작치에 관해 Taylor급수로 1차항까지 전개한 후 파라미터의 값을 대입하여 상태방정식으로 표현하면 다음과 같다.⁴⁾

$$x = Ax + Bu$$

여기서

$$x = (\delta X_p, \delta P_p, \delta T_i)^T$$

$$u = (W_{sur}, W_{sp}, W_{rv}, Q_{htr})^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 0. & 0. & 0. \\ 0. & 0. & 0. \\ 0. & 0.00319 & -0.05 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -3.04 \times 10^{-4} & -3.69 \times 10^{-4} & 1.55 \times 10^{-4} \\ 0.8609 & -0.906 & -4.983 \\ 0. & 0. & 0. \\ 3.63 \times 10^{-7} \\ 0.01 \\ 0. \end{bmatrix}$$

일반적으로 고장 진단 기법은 컴퓨터를 이용하므로 위의 계통을 샘플링 시간을 1초로 하여 이산치 계통으로 변환하면 다음과 같다.

$$x(k+1) = Fx(k) + Gu(k)$$

$$F = \begin{bmatrix} 1.0 & 0. & 0. \\ 0. & 1.0 & 0. \\ 0. & 0.00311 & 0.95123 \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} -3.04 \times 10^{-4} & -3.69 \times 10^{-4} & 1.55 \times 10^{-4} \\ 0.86096 & -0.906 & -4.983 \\ 1.35 \times 10^{-3} & -1.42 \times 10^{-3} & -7.82 \times 10^{-3} \\ 3.63 \times 10^{-7} \\ 0.01 \\ 1.57 \times 10^{-4} \end{bmatrix}$$

가압기에는 가압기의 수위를 계측하기 위한 L_1 , 온도를 계측하기 위한 T_1 , 압력을 계측하는 P 의 계측장치가 있다. 이 중에서 가압기의 수위는 다음 식에 의해 구해진다.

$$L_1 = A_p (1 - X_p) \frac{V_p}{v_p} V_f \quad (2.10)$$

여기서 A_p 는 포화수의 체적과 수위 사이의 변환 계수이다.

따라서, 각 계측 장치와 상태 변수의 관계는 다음과 같다.⁴⁾

$$y = \begin{bmatrix} L_1 \\ P_1 \\ T_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -197.5 & 0.0149 & 0. \\ 0. & 1. & 0. \\ 0. & 0. & 1. \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta X_p \\ \delta P_p \\ \delta T_i \end{bmatrix}$$

이들 계측 장치에 들어오는 잡음은 평균치 0인 Gaussian 백색 잡음이라고 가정한다.

3. 고장 진단 기법

가압기의 계측 장치에 고장이 발생하였을 때 이를 검출하기 위해 DOS^{9),5)}와 GLR기법⁷⁾을 적용한 연구결과가 보고되었으나 DOS는 설계의 복잡성과 계산 시간 부담이 크고, GLR 기법은 고장 양상의 선행 정보가 필요하며 계산량이 많고 고장 판단에 시간 지연이 있다는 단점 때문에 실시간 고장 진단에 적합하지 않다. 그러므로 이와 같은 단점을 피하기 위해 본 연구에서는 Friedland의 SBE (separate bias estimation) 기법^{9),10)}을 도입하고 한계 영역조사를 행하므로써 계산시간을 단축할 수 있는 고장 진단 방법을 제시하였다. 본 연구에서 설계한 고장 진단 기법은 다음과 같다.

3.1 문제 설정

계통의 동특성은 다음과 같이 선형 이산치 계통으로 표현할 수 있다.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + v(k)$$

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + v(k) \quad (3.1)$$

$$y(k) = Cx(k) + w(k) \quad (3.2)$$

여기서 x 는 계통상태 변수 벡터, y 는 계통의 출력 벡터, u 는 제어 입력 벡터, v, w 는 계통과 계측장치에 들어오는 평균치가 0인 Gaussian 백색 잡음이며 공분산이 각각 Q, R 이다.

계통이나 계측 장치에 발생할 수 있는 고장은 구동기(actuator)고장, 계통 파라미터 변화, 계측 장치의 스케일 편차, 스텝 bias등이 있다. 계통이나 계측 장치에 이와 같은 고장이 발생하면 식(3.1), (3.2)는 다음과 같이 수정할 수 있다.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Eb + v(k) \quad (3.3)$$

$$y(k) = Cx(k) + Hb + w(k) \quad (3.4)$$

여기서 b 는 고장 벡터이며 고장 양상은 갑작스러운 스텝 형태의 입력이 들어오거나 계측 장치에서 스텝 $bias$ 가 나타나는 것으로 모델화할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 대부분의 고장시에 $bias$ 는 piecewise constant로 주어진다고 가정한다.

3.2 Kalman 필터

Kalman 필터는 계통의 동특성과 잡음 모델을 이용하여 계통의 상태를 추정하기 위한 것이며 최적 상태 추정은 기본적으로 순환 최소 자승(recursive least square) 기법에 의해 행한다. Kalman 필터에 관한 많은 연구가 있으므로 여기서는 자세한 유도 과정은 피하고 간략하게 그 결과만 기술하겠다¹¹⁾. Kalman 필터는 식 (3.1), (3.2)와 같이 계통에 고장이 발생하지 않았을 때 상태를 추정하는 역할을 한다.

Kalman 필터의 기법은 다음과 같다.

$$\bar{x}(k) = A\bar{x}(k-1) + Bu(k) \quad (3.5)$$

$$\hat{x}(k) = \bar{x}(k) + K(k)(y(k) - C\bar{x}(k)) \quad (3.6)$$

$$\bar{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + Bu(k+1) \quad (3.7)$$

여기서 \hat{x} 는 x 의 추정치이다. 한편 K 는 필터 이득 이득이며 다음 식과 같다.

$$K(k) = P(k)C^T(CP(k)C^T + R(k))^{-1} \quad (3.7)$$

여기서 P 는 공분산 행렬로서 다음 식에 의해 구해진다.

$$P(k+1) = A(I - K(k)C)P(k)A^T + Q(k+1) \quad (3.8)$$

정상 상태시 편차(residual) r_0 은 다음 식으로 주어진다.

$$r_0(k) = y(k) - C\bar{x}(k) \quad (3.9)$$

이때 편차 r_0 은 평균치가 0인 백색 잡음이며 공분산 행렬은 다음과 같다.^{7),9)}

$$Vr = CP(k)C^T + R(k) \quad (3.10)$$

이상과 같은 Kalman 필터는 정상 동작시 계통의 상태를 추정하는 역할을 하며 고장이 발생하였을 때 이를 알려주는 단서를 제공한다. 고장이 발생 하던 다음에 설명할 고장 추정 필터에 의해 고장의 위치와 크기를 추정하고 Kalman 필터에 의한 상태 추정치를 보상하게 된다.

3.3 bias 추정 기법

식(3.4), (3.5)와 같이 $bias$ 가 존재할 때 $bias$ 를 추정하기 위한 최적 $bias$ 추정기는 다음과 같다.^{9),10)}

$$\hat{b}(k) = (I - G(k)S(k))\hat{b}(k-1) + G(k)r(k) \quad (3.11)$$

여기서 \hat{b} 는 b 의 추정치, r 은 고장 발생시 Kalman 필터 편차이며 G 는 $bias$ 추정기의 이득 행렬이며 다음과 같다.

$$G(k) = M(k+1)(CV(k)+H)^T R(k)^{-1} \quad (3.12)$$

여기서 M 은 $bias$ 추정기의 공분산 행렬이며 다음과 같다.

$$M(k+1)^{-1} = M(k)^{-1} + S(k)^T(CP(k)C^T + R(k))^{-1}S(k) \quad (3.13)$$

여기서 V, S 는 다음 관계에 의해 주어진다.

$$S(k) = CU(k) + H \quad (3.14)$$

$$V(k) = U(k) - K(k)S(k) \quad (3.15)$$

$$U(k+1) = AV(k) + E \quad (3.16)$$

마지막으로 $bias$ 가 발생했을 때 x 의 추정치는 다음과 같이 보상된다.

$$\tilde{x}(k) = \hat{x}(k) + V(k)\hat{b}(k) \quad (3.17)$$

위에서 주어진 최적 $bias$ 추정기는 편차에 의해 항상 $bias$ 추정기를 동작시킨다. 그러나 계통 전체 운용 시간에 비해 고장이 발생할 확률은 상당히 적으므로 항상 추정기를 동작 시키는 것은 불필요하다. 또한 정상 동작시에도 잡음에 의해 $bias$ 추정기가 구동되므로 $bias$ 추정치가 0이 되지 않는다. 그러므로 식(3.17)의 상태 추정 보정치는 참값에 수렴하지 않는다. 이와 같은 단점을 해결하기 위해 한계 영역(threshold)을 정의한다. 한계 영역은 Kalman 필터의 편차 크기에 의거하여 결정한다.

Kalman 필터의 편차는 고장 발생시 다음과 같다.¹⁰⁾

$$r(k) = S(k)b + r_0(k) \quad (3.18)$$

여기서 r_0 은 고장이 발생하지 않았을 경우의 Kalman 필터 편차이다. 정상 상태중의 Kalman 필터 편차 r_0 의 크기는 계통 운용 자료에 의해 알 수 있으므로 이 값의 절대치에 대해 한계 영역을 결정하여 놓으면 고장이 발생했을 때 b 에 의해 r 의 절대치는 커지게 되므로 한계 영역을 넘게 된다. 따라

서 고장이 발생했음을 알 수 있다. 그러므로 고장이 발생한 성분에 대한 bias 추정기를 구동시킨다. 대부분의 경우 2개 이상의 계측 장치에서 동시에 고장이 발생할 확률은 극히 적으므로 1개의 계측 장치 고장만을 고려할 경우 1차의 고장 추정기를 구동시키게 되므로 계산 시간이 크지 않게 된다.

4. 결과 및 검토

가압기의 계측 장치에 고장이 발생하였을 때 본 연구에서 설계한 고장 진단 기법의 성능을 평가하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다. 시뮬레이션하는데 사용한 컴퓨터 프로그램의 흐름 선도는 그림 2에 있다.

$$\sigma_x = 0.05 \text{ in}, \sigma_p = 0.2 \text{ psia}, \sigma_T = 0.5^\circ\text{F}$$

계통에 대한 잡음은 W_{sur} 신호에 들어 온다고 가정한다. 이 때 잡음의 표준 편차는 0.5 lbm/s이다.

계측 장치의 고장만을 고려할 경우 식(3.3)의 E는 0이다. 각 계측 장치에 대한 한계 영역은 잡음의 통계학적 특성과 정상 상태중의 Kalman 필터 편차 크기를 고려하여 각각 0.4, 1.0, 1.5 로 주었다. 만일 한계 영역을 적게 주면 정상 상태에서도 잡음에 의해 허위 고장 경보가 발생할 수 있다. 반면 한계 영역을 크게 주면 고장의 크기가 작을 경우 이를 감지하지 못하므로 이의 적절한 선택이 필요하다.

시뮬레이션에 이용한 Kalman 필터 공분산 행렬의 초기치는 다음과 같다.

$$P = \begin{bmatrix} 0.088 & 0. & 0. \\ 0. & 0.1241 & 0. \\ 0. & 0. & 0.0278 \end{bmatrix}$$

Kalman 필터의 이득과 공분산 행렬의 정상 상태치는 다음과 같다.

$$K = \begin{bmatrix} -0.2255 \times 10^{-2} & 0.3108 \times 10^{-4} & 0.2079 \times 10^{-7} \\ 0.1032 & 0.8447 & 0.7656 \times 10^{-4} \\ -0.2966 \times 10^{-3} & 0.4785 \times 10^{-3} & 0.5410 \times 10^{-4} \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} 0.5164 \times 10^{-7} & 0.1243 \times 10^{-5} & 0.8814 \times 10^{-8} \\ 0.1243 \times 10^{-5} & 0.2196 & 0.1233 \times 10^{-3} \\ 0.8814 \times 10^{-8} & 0.1233 \times 10^{-3} & 0.1313 \times 10^{-4} \end{bmatrix}$$

각 계측 장치에 대해 25초에서 2.0, 1.5, 2.0의 크기를 갖는 스텝 형태의 고장이 발생하였을 때, 이를 추정한 것이 그림 3, 4, 5이다. 그림 3이 그림 4, 5보다 bias 추정치가 맥동하지 않는 이유는 잡음의 크기가 상대적으로 작으므로 bias 추정치가 잡음의 영향을 덜 받기 때문이다. 그림에서 고장이 발생하면 즉시 고장을 검출하고 그 크기를 추정하는 것을 볼 수 있다. 따라서 고장의 추정 성능이 대단히 우수함을 알 수 있다. 수위 계측 장치에 점프와 램프 형태의 고장이 발생하였을 때 이를 추정

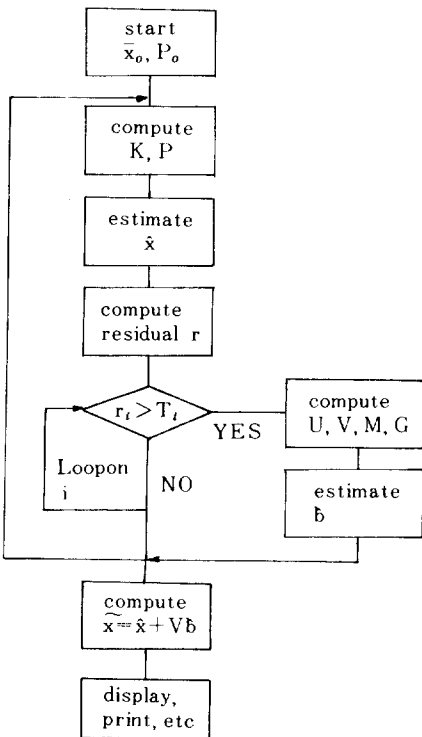


그림 2. 컴퓨터 프로그램의 흐름 신호 선도
Fig. 2. Computer program flow chart

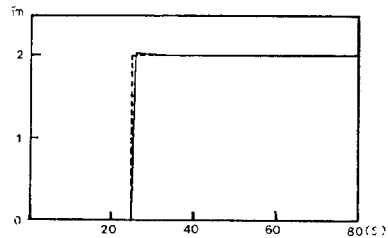


그림 3. 수위 계측 장치의 스텝 고장시 고장 추정

Fig. 3. Fault identification for step fault on level instrument.

한 것이 그림 6, 7 이다. 3.1절에서 고장이 스텝으로 주어진다고 가정하였으나 그림과 같이 점프와 램프 형태의 고장에 대해서도 고장 진단이 가능함을 알 수 있다. 수위 계측 장치에서 그림 3과 같은 스텝 고장시 Kalman필터에 의한 상태 변수 추정치와 고장 진단 후 상태 변수 추정치를 보상한 결과가 그림 8 이다. 고장난 계측 장치의 정보에 의한 Kalman필터의 상태 변수 추정치는 그림과 같이 참값에 대

해 편차를 보이거나 제안된 고장 진단 기법에 의해 보상된 상태 변수 추정치는 참값에 수렴하고 있음을 볼 수 있다. 그림 4, 5의 경우도 유사한 결과를 보이므로 생략하였다. 그러므로 계측 장치의 교체없이 제어를 할 수 있다.

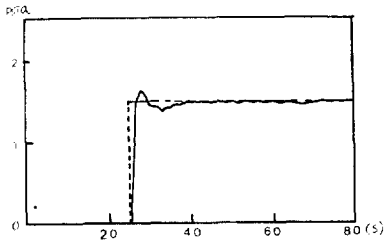


그림 4. 압력 계측 장치의 스텝 고장시 고장 추정

Fig. 4. Fault identification for step fault on pressure instrument

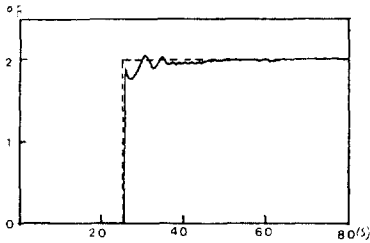


그림 5. 온도계측장치의 스텝고장시 고장추정.

Fig. 5. Fault identification for step fault on temperature instrument

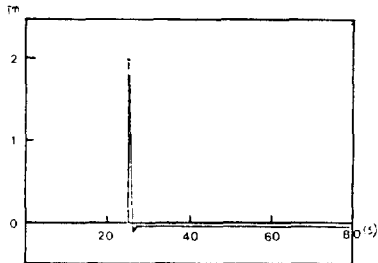


그림 6. 수위 계측 장치의 점프 고장시 고장 추정

Fig. 6. Fault identification for jump fault on level instrument

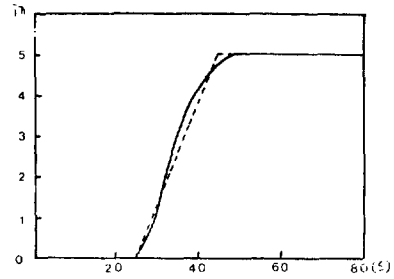


그림 7. 수위 계측 장치의 램프 고장시 고장 추정

Fig. 7. Fault identification for ramp fault on level instrument

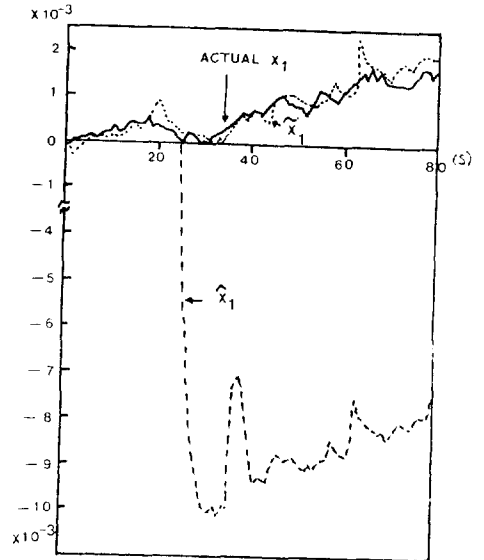


그림 8. 수위 계측 장치의 스텝 고장시 Kalman필터의 상태 추정치와 보상된 상태 추정치

Fig. 8. Estimates using Kalman filter fault on and corrected estimates for step fault on level instrument

3. 결 론

본 연구에서는 가압 경수형 원자로의 가압기 계측 장치에 고장이 발생하였을 때 이를 검출하는 고장 추정기를 설계하였다. 고장 진단 기법에 관한 연구는 근래에 많은 주목을 받는 분야이며 현재 우주항공분야를 비롯하여 많은 산업 분야에 활발히 적용되고 있다. 그러나 대부분의 연구 결과는 고장 진단 기법의 설계가 복잡하며 고장 양상에 대한 정보를 필요로 하거나 계산량이 커서 원자로 분야에 직접 적용하기에는 많은 제약이 있었다. 그러므로 본 연구에서는 이와 같은 단점을 제거하기 위한 고장 진단 기법을 제안하였다. 이 고장 진단 기법은 Kalman 필터와 bias 추정기의 2 개의 필터로 구성되어 있으며 고장 추정기는 Kalman 필터의 편차에 의한 한계 영역 조사를 행하므로써 bias 추정기의 차수와 계산 시간을 줄였고 Kalman 필터와 같은 형태이므로 설계가 간단하다. 또한 고장 양상에 대한 정보가 필요없게 된다.

제안된 고장 진단 기법의 성능을 평가하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 가압기 계측 장치에 고장이 발생하였을 때 이를 검출하고 진단하였다. 계측 장치의 고장을 스텝, 점프, 램프형태로 발생시켜본 결과 제안된 고장 진단 기법은 고장 발생 즉시 고장을 검출하였고 고장의 크기를 빠른 시간내에 정확히 추정함을 알 수 있었다. 따라서 설계된 고장 추정기는 가압기의 계측 장치 고장 진단에 유용하게 사용할 수 있다. 또한 고장 성분의 크기를 추정하여 Kalman 필터에 의한 상태 추정치를 보상한 결과 보상된 상태 변수 추정치는 실제치에 수렴하는 것을 볼 수 있었다. 그러므로 본 연구에서는 가압기의 세어 문제는 다루지 않고 있으나 보상된 상태 변수 추정치를 이용하여 고장난 계측 장치의 교체없이 지속적인 제어가 가능하다.

REFERENCE

- 1) A.S.Willsky, "A survey of design methods for failure detection in dynamic systems, "Automatica, Vol.12, pp. 601-611, 1976
- 2) B.R.Upadhaya, "Sensor failure detection and estimation, " Nuclear Safety, Vol.26, No.4, pp.387-404, 1984
- 3) R.N.Clark, "Instrument fault detection, " IEEE Trans .Aero.and Elec.Sys., Vol.AES-14, pp.456-465, 1987
- 4) R.N.Clark and B. Campbell, "Instrument fault detection in a pressurized water reactor pressurizer, "Nuclear Technol., Vol. 56,pp.23-32, 1982
- 5) J.L.Tylee, "On-line failure detection in nuclear power plant instrumentation. "IEEE Trans. Auto. Contr., Vol. AC-28,pp. 406-415, 1983
- 6) M. Kitamura, "Dectecton of sensor failure in nuclear plants using analytical redundancy, "Trans.Am. Nucl.Soc.,Vol.34,pp.581-583, 1980
- 7) J.L.Tylee, "A generalized likelihood ratio approach to detecting and identifying failure in pressurizer instrumentaion, "Nuc'l. Technol.,Vol.56,pp. 484-492, 1982
- 8) A.S.Willsky and H.L.Jones, "A generalized likelihood ratio approach to detection and estimation of jump in linear systems, "IEEE Trans. Auto.Contr.,Vol.AC-24,pp.108-112,1976
- 9) B.Friedland, "Treatment of bias in recursive filtering, "IEEE Trans. Auto.Contr., Vol.AC-14, pp.359-367,1969
- 10) B.Friedland, "Notes on separate-bias estimation, "Ieee Trans Auto.Contr.,Vol.AC-14,pp. 745-738, 1978
- 11) A. Gelb, "Appied optiman estimation, "MIT press, Cambridge, Massachusetts, 1974