

PWR증기발생기의 고장검출 및 진단에 관한 연구

A Fault Detection and Diagnosis in a PWR Steam Generator

朴 勝 燁*
(Seung-Yub Park)

요 약

본 연구목적은 증기발생기의 계통고장과 측정장치고장을 진단하기 위한 고장검출 및 진단기법을 개발하는 것이다. 제안된 고장진단기법은 고장검출기, 칼만필터와 2개의 bias 추정기로 구성되어 있다. 증기발생기의 고장검출을 위하여 정상상태에 대해 설계한 칼만필터편차의 평균치조사를 행하였다. 만일 필터편차의 평균치가 주어진 한계영역을 넘으면 고장발생이 선언되고, 고장크기를 추정하고 측정장치고장과 계통고장을 구분하기 위해 2개의 bias 추정기를 구동시킨다. 본 연구에서 고려한 계통고장은 출구관 온도의 이상, 급수히터 고장, MSCV 고장이고 측정장치고장에 대해서는 증기발생의 3개 측정장치를 대상으로 하였다. 제시된 고장진단기법을 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 적용한 결과 신속하고 정확한 고장추정 결과를 얻었다.

Abstract- The purpose of this study is to develop a fault detection and diagnosis scheme that can monitor process fault and instrument fault of a steam generator. The suggested scheme consists of a Kalman filter and two bias estimators. Method of detecting process and instrument fault in a steam generator uses the mean test on the residual sequence of Kalman filter, designed for the unfailed system, to make a fault decision. Once a fault is detected, two bias estimators are driven to estimate the fault and to discriminate process fault and instrument fault.

In case of process fault, the fault diagnosis of outlet temperature, feed-water heater and main steam control valve is considered. In instrument fault, the fault diagnosis of steam generator's three instruments is considered. Computer simulation tests show that on-line prompt fault detection and diagnosis can be performed very successfully.

1. 서 론

*正 會 員 : 昌原大 工大 電子工學科 助教授 · 工博
 接受日字 : 1990年 7月 24日
 1次修正 : 1990年 11月 20日
 2次修正 : 1990年 12月 12日

원자력발전소는 만일의 사고시 큰 피해가 예상
 되므로 안전성 및 신뢰도의 확보가 가장 우선적인

문제로 취급되어 왔다. 따라서 원자력발전소의 각종 측정장치, 보호장치, 안전장치들은 대부분 3중 이상의 다중방식으로 설치되어 있으므로 원자로계통의 안전성이 높은 것은 분명하다. 그러나 이러한 조치에도 불구하고 발생한 1979년 미국의 트리마일섬 원자력발전소 사고와 1986년 소련의 체르노빌 원자력발전소 사고등은 원자력발전소의 안전성확보를 위한 기존방법의 신뢰성을 재고하게 하였으며 그 후로 사고의 분석, 사고의 예방대책에 대한 연구, 특히 전반적인 사고로 파악될 수 있는 각 구성기기 고장의 조기검출 및 진단대책의 개발이 절실히 요구되고 있으며 이에 관한 많은 연구결과가 보고되고 있다.

최근 이 분야에 관한 연구는 하드웨어 중첩도(hardware redundancy)에 근거한 종래방식에서 탈피하여 소프트웨어 중첩도(software redundancy)를 이용한 해석적기법이 그 주류를 형성하고 있다. 해석적기법의 대표적인 것으로는 DOS(dedicated observer scheme) [1], GLR(generalized likelihood ratio)기법 [2], 고장검출필터(detection filter) [3], MLE(maximum likelihood estimation)기법 [4]등을 들 수 있다.

이들 방법을 적용한 연구결과는 나름대로 타당하지만 각 기법 자체가 갖는 단점을 보완하지 않았다. 예를들어 DOS는 모든 측정장치 각각에 대해 같은 수의 상태추정기를 구동해야 하며 GLR기법은 가설조사(hypothesis test)에 근거하는 관계로 발생가능한 고장양상에 대한 정보가 필요할뿐 아니라 매 샘플링 구간마다 각 고장별로 가설조사를 수행해야 하기 때문에 계산량이 커 실시간 적용에 문제점이 있다. 고장검출필터는 고장요소의 파라미터변화에 대한 정보를 얻기 힘들고 시변계통에 대해 적용할 수 없는 단점을 갖는다. 마지막으로 MLE기법은 bias추정기가 항상 구동되며 고장을 감지하기 위해 트리거(trigger)행렬과 고장신호(failure signature)행렬의 곱이 대각행렬이 되도록 칼만필터이득을 결정해야 하는데 3차 이상의 계통에서는 이러한 필터이득의 계산이 불가능하다.

이제까지의 연구결과에서 나타난 또 다른 문제점은 대부분의 연구가 측정장치고장과 계통고장중 한가지의 고장만을 가정하였으므로 측정장치고장과 계통고장 두가지를 동시에 고려해야 하는 계통에 대한 처리방안이 제시되지 않고 있다는 것이다.

한편 증기발생기는 원자로계통에서 필수 불가결한 요소로서 증기발생기에 관련한 오동작에 의해

원자로계통의 운전중지가 빈번하므로 신뢰도, 안전성과 경비등을 고려하면 증기발생기의 고장검출 및 진단기법의 연구와 치명적인 고장이 아닐 경우 계속적인 운전이 가능하도록 하는 제어계통의 설계가 매우 중요하고 필요한 실정이다.

따라서 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 bias추정기법 [5]을 도입한 고장진단기법을 설계하였다. bias추정기법은 계통이나 측정장치에 대한 bias를 추정하기 위한 것으로 비교적 계산량이 적고 설계가 간단하므로 고장진단기법에 적용하기에는 적합하다. 그러나 bias추정기법을 고장진단에 직접 적용할 수 없으므로 고장을 검출하기 위한 고장검출기와 계통고장과 측정장치고장을 구분하기 위한 2개의 bias추정기를 설계하였다. 제시된 고장검출 및 진단기법은 정상동작 상태시 계통의 상태를 추정하기 위한 칼만필터, 칼만필터 편차에 평균치조사를 행해 고장을 검출하는 고장검출기, 고장검출기로부터 고장검출신호가 발생하였을 때 계통고장과 측정장치고장을 구분하고 고장크기와 부위를 추정하기 위한 2개의 bias추정기로 구성되어 있다.

2. PWR 증기발생기의 수학적 모델

현재 우리나라에 도입되어 운전중인 원자로는 월성 3호기를 제외하고는 모두 가압경수형원자로(PWR: pressurized water reactor)이다. 따라서 정격출력 1200MWe PWR증기발생기를 연구대상으로 하였다.

J.B. Freels [6]는 57개의 연립방정식으로 PWR 모델을 세우고 각 계통변수들의 이론치와 실험치를 비교하여 거의 일치함을 보였다. 본 연구에서는 이 모델을 근거로 해서 간략화된 3차의 증기발생기모델을 수립하였다. 이 모델은 20차의 증기발생기모델을 물리적방법을 이용하여 3차 모델로 저차화 시킨 것이다. 이 과정은 매우 길고 복잡하므로 여기서는 결과 [7]만을 기술하겠다.

증기발생기의 상태방정식은 다음과 같다.

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

여기서 $x = (\delta T_p, \delta T_m, \delta P_s)^T, u = (\delta T_{h1}, \delta T_w, \delta \epsilon / \epsilon_0)^T$ 이며 δT_p 는 증기발생기내의 노심냉각재의 평균온도 변화, δT_m 은 증기발생기의 급수슈브 평균온도 변화, δP_s 는 증기발생기 평균증기압력변화, δT_{h1} 는 노심출구관온도 변화, δT_w 는 급수히터 출구온도 변화, $\delta \epsilon / \epsilon_0$ 는 수증기 제어밸브계수 변화율이다. 그리고 정격운전중의 공칭값은 다음과 같다.

$T_p=592.5$ °F, $P_s=832$ psig, $T_{h1}=592.5$ °F, $T_w=434.3$ °F, $\epsilon_o=1.2463$ lbm/sec-psi.

이와 같은 운전조건상에서 계통행렬은 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} -1.6055 & 1.2805 & 0. \\ 4.7874 & -7.7818 & 0.41922 \\ 0. & 5.5986 & -0.93331 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -0.32502 & 0. & 0. \\ 0. & 0. & 0. \\ 0. & 0.1914 & -12.338 \end{bmatrix}$$

3. 고장검출 및 진단기법 설계

3.1 문제설정

가제어성과 가관측성을 갖는 다음과 같은 선형 계통을 고려하자.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + v \quad (1)$$

$$y(t) = Cx(t) + w \quad (2)$$

여기서 x 는 $n \times 1$ 상태변수벡터, u 는 $r \times 1$ 제어입력벡터, y 는 $p \times 1$ 출력벡터로 측정장치의 신호이며 v 와 w 는 평균치가 0인 계통과 측정장치의 gaussian 백색잡음이며 공분산이 각각 Q , R 이다.

만일 계통과 측정장치에 고장이 발생하면 식(1)과 식(2)는 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Eb + v \quad (3)$$

$$y(t) = Cx(t) + Hb + w \quad (4)$$

여기서 b 는 $q \times 1$ 고장벡터이다. 그리고 E 와 H 는 b 가 계통과 측정장치에 영향을 미치는 통로를 나타내며 실험적정보 혹은 설계자에 의해 결정될 수 있다.

3.2 칼만필터

칼만필터는 고장이 발생하지 않았을 때 상태변수를 추정하는 역할을 하며 고장발생시에는 고장검출을 위해 필터편차에 의한 정보를 제공한다.

칼만필터는 다음 식으로 주어진다.

$$\hat{\dot{x}}(t) = A\hat{x}(t) + K[y - C\hat{x}(t)] + Bu(t) \quad (5)$$

여기서 \hat{x} 는 x 의 추정치이며 K 는 필터이득으로서 다음 식에 의해 주어진다.

$$K = PC^T R^{-1} \quad (6)$$

$$\dot{P} = AP + PA^T - PC^T R^{-1} CP + Q \quad (7)$$

여기서 P 는 필터 공분산행렬이며 필터편차는 다음과 같다.

$$r(t) = y(t) - C\hat{x}(t) \quad (8)$$

대부분의 고장이 정상상태(steady state)중에 발생한다고 가정하면 필터이득은 정상상태에 도달하게 된다. 따라서 필터이득행렬등을 매 샘플링구간마다 반복계산한다는 것은 계산시간이 불필요하게 걸리므로 바람직하지 않다. 그러므로 설계과정에서 미리 정상상태해를 구해 이 값을 사용하면 식(6), (7)의 반복계산이 필요없으므로 계산시간이 단축된다.

3.3 bias추정기

식(3), (4)와 같이 계통이나 측정장치에 고장이 발생하여 bias가 존재하면 칼만필터는 더 이상 올바른 상태추정치를 제공할 수 없다. 이는 칼만필터를 설계할 때 사용된 계통모델(정상동작상태 모델)이 고장이 발생한 실제계통과 다르기 때문이다. 그러므로 계통상태에 관한 정보를 얻기 위해서는 고장에 위한 bias를 추정하여 칼만필터의 상태추정치를 보상하여야 한다. 또한 고장위치와 크기를 진단하기 위해 고장벡터를 추정해야 한다.

bias추정기는 다음과 같다[5].

$$\hat{b} = M(CV + H)^T R^{-1} [- (CV + H) \hat{b} + (y - C\hat{x})] \quad (9)$$

여기서 V 와 M 은 bias추정기의 이득행렬과 공분산행렬로서 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{V} = (A - PC^T R^{-1} C)V + (E - PC^T R^{-1} H) \quad (10)$$

$$\dot{M} = -M(CV + H)^T R^{-1} (CV + H)M \quad (11)$$

마지막으로 bias가 발생했을 때 x 의 추정치는 칼만필터의 상태추정치에 대해 다음과 같이 보정된다.

$$\hat{x}(t) = \hat{x}(t) + V\hat{b} \quad (12)$$

한편 필터이득행렬의 정상상태해를 이용하여 칼만필터를 구동시킨다면 식(10)의 V 역시 다음식과 같이 정상상태해를 구할 수 있다.

$$V = (A - KC)^{-1} (KH - E) \quad (13)$$

3.4 고장검출

본 연구에서의 고장검출방법은 다음과 같다. 먼저 N 개의 필터편차 샘플치에 대한평균치를 다음과 같이 구한다.

$$RM_i(k) = \left(\sum_{j=k-N+1}^k r_i(j) \right) / N, i=1,2,\dots,m$$

여기서 m 은 측정장치의 수이며 r_i 는 r 의 i 번째 요소이다. 고장이 발생하지 않았으면 $RM_i(k)$ 는 일정범위내의 값이 된다. 그러나 고장이 발생하면 이 값이 일정범위값을 벗어나므로 다음과 같이 한계영역을 초과하게 된다.

$$RM_i(k) > T_{max}(i) \text{ 혹은 } RM_i(k) < T_{min}(i)$$

윗 식을 만족하면 고장이 발생하였음을 선언하게 된다. 여기서 T_{max} 와 T_{min} 은 계통의 정상운전중의 자료를 이용하여 결정한다.

3.5 측정장치고장과 계통고장의 구별

측정장치고장과 계통고장을 구분하고 진단하기 위하여 필터편차에 의해 동작하는 2개의 bias 추정기를 도입한다. 하나는 계통고장에 대해, 또 다른 하나는 측정장치고장에 대한 것이다. PFBE(process fault bias estimator)는 검출된 고장이 계통고장에 의한 것이라는 가정하에 바이어스를 추정하며, SFBE(sensor fault bias estimator)는 검출된 고장이 측정장치에 의한 것이라는 가정하에 고장을 추정한다. 이때 PFBE는 3.3절에서의 바이어스추정기를 $H=0$ 이고, SFBE는 $E=0$ 으로 하고 설계한다. 그리고 측정장치고장과 계통고장이 동시에 발생하지 않는다는 가정하에 측정장치고장과 계통고장을 구분하기 위한 논리는 다음과 같다.

만일 측정장치에 고장이 발생하였다면, SFBE의 출력추정치는 실제 계통의 출력과 거의 같고, PFBE의 출력추정치는 계통의 출력과 차이가 있을 것이다. 만일 계통고장이 발생하면 반대가 된다.

4. 증기발생기의 고장검출 및 진단

4.1 개요

본 장에서는 컴퓨터 시뮬레이션에 의해서 얻어진 결과를 분석검토하여 전장에서 제시한 고장진단기법의 성능에 대해 고찰한다. 설계된 고장검출 및 진단기법의 성능평가는 고장발생시 어느 정도 빠른 시간내에 고장발생을 감지하고 고장크기를 정확히 진단할 수 있는가에 의해 판별된다.

증기발생기에는 노심냉각재온도, 튜브금속온도, 증기압력을 측정하는 3개의 측정장치가 있다. 각 측정장치에 들어오는 잡음의 표준편차는 압력측정장치는 0.2psia, 온도측정장치에 대해 0.5°F로 주었다. 고장검출을 위한 한계영역을 정하기 위해 정규상태중에 칼만필터편차의 샘플치 20개에 대해

평균치조사를 행한 결과 평균치에 대해 다음과 같은 최소값과 최대값을 얻었다.

$$R_{max} = (0.1661, 0.2212, 0.1024),$$

$$R_{min} = (-0.2539, -0.2377, -0.0795)$$

이와 같은 평균치의 최대치와 최소치에 대해 다음과 같은 한계영역을 설정하였다.

$$T_{max} = (0.2, 0.3, 0.15), \quad T_{min} = (-0.3, -0.3, -0.1)$$

그리고 식(3), (4)의 E , H 는 각각 단위행렬로 주었다.

4.2 증기발생기의 계통고장 검출 및 진단

증기발생기 모델은 출구관온도에 관한 항이 입력항으로 포함되어 있다. 원자로노심에서 고장이

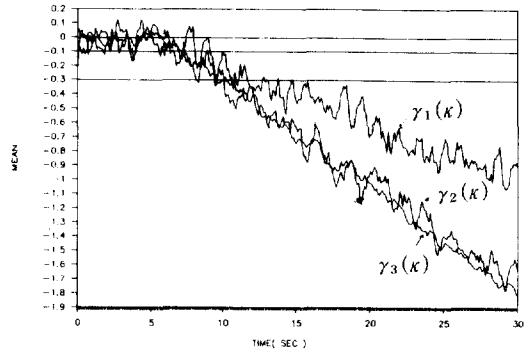


그림 1 출구관온도 고장; 증기압력에 대한 칼만 필터편차의 평균치

Fig. 1 Outlet temperature fault; Kalman filter residual mean of steam pressure

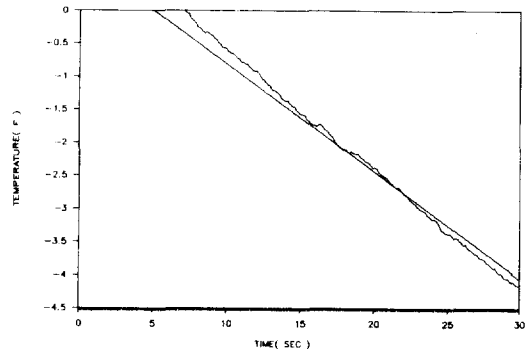


그림 2 출구관온도 고장시 고장추정

Fig. 2 Estimate of outlet temeprature fault

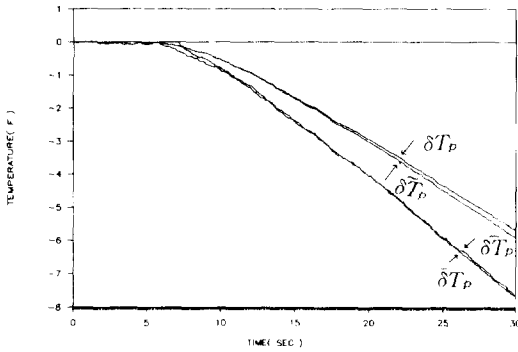


그림 3 출구관온도 고장시 노심냉각생각재 온도의 추정
Fig. 3 Outlet temperature fault; estimate of primary fluid temperature

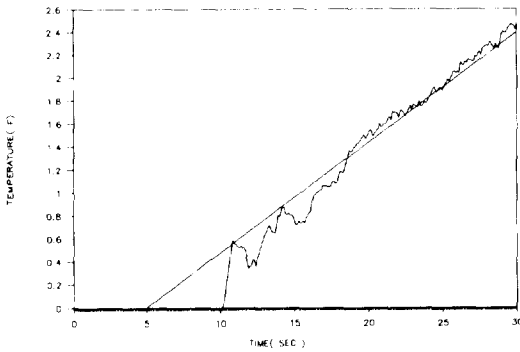


그림 4 급수히터 고장시 고장추정
Fig. 4 Estimate of feedwater heater fault

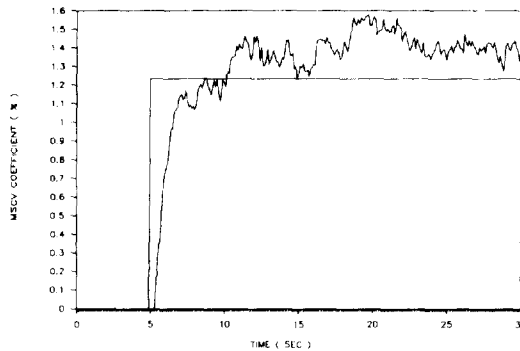


그림 5 MSCV 고장시 고장추정
Fig. 5 Estimate of MSCV fault

발생하여 1차급수온도가 변화하면 출구관온도도 변화하게 된다. 따라서 출구관온도의 이상을 검출

하게 되면 노심에 이상이 발생한 것을 검출할 수 있다. 정상상태중에 출구관온도가 초당 0.5°F씩 증가하는 고장을 고려하자. 5초에 고장이 발생하였다. 이 고장의 경우 E를 단위행렬로 주었으므로 고장크기는 초당 $0.32502 \times 0.5 = 0.16251$ 씩 감소하게 된다(2장 참고). 그림 1은 필터편차의 평균치 변화, 그림 2는 PFBE에 의한 출구관온도 고장크기 추정, 그림 3은 노심냉각재 온도변화를 추정한 것이다. 그림에서 윗첨자 기호 \sim 는 칼만필터의 추정치, $\hat{\sim}$ 는 PFBE에 의해 보상된 추정치, $\tilde{\sim}$ 는 SFBE에 의해 보상된 추정치를 나타내며 이후에도 같은 기호를 사용하도록 한다. 그리고 이후의 평균치조사에 의한 고장검출과 상태추정치는 각각 그림1, 3과 유사하므로 지면관계상 생략한다.

급수히터 온도가 초당 0.5°F씩 증가한 경우를 고려하자. 이 고장의 경우 고장크기는 초당 $0.1914 \times 0.5 = 0.0957$ 이다(2장 참고). 이 고장원인은 급수히터를 가열하는 증기는 급수히터내의 급속튜브를 통해 흐르는데 급속튜브에 구멍이 생겨 증기가 급수히터의 2차급수와 혼합되므로써 온도가 증가한 것이다. 그림4는 PFBE에 의한 고장크기추정을 나타낸다. 고장검출이 다소 늦는 이유는 급수히터는 원자로계통의 2차측에 존재하여 고장영향이 작기 때문이고, 고장추정치가 맥동하는 이유는 잡음의 영향을 받기 때문이다.

주증기 제어밸브(MSCV ; main steam control valve)는 터빈에 공급되는 증기량을 조절하여 발전기출력을 제어하기 위한 것이다. MSCV를 10% 열도록 동작시켰는데 MSCV의 고장으로 구동되지 않는 경우(고장크기 : 1.2338)를 고려하자. 고장원인은 밸브구동기에서 고장이 발생하였거나 밸브 자체의 고장(예를 들어 밸브시스템이 밸브몸체에 고착)으로 인한 것이다. 그림5는 PFBE에 의한 MSCV의 고장크기 추정치를 나타낸다. 그림 2, 4에서 램프형태의 고장도 추정성능이 양호함을 알 수 있다. 이는 bias가 미지상수라는 가정하에 bias 추정기가 설계되었지만 bias추정성능이 우수하므로 느린 램프 고장의 추정이 가능한 것이다. 그림 3에서 PFBE에 의한 상태추정치는 상태변수를 매우 잘 추정하나 칼만필터와 SFBE의 상태추정치는 오차가 있음을 알 수 있다.

4.3 증기발생기의 측정장치 고장

측정장치에서 발생할 수 있는 고장양상으로는 측정장치의 측정범위를 넘는 고장, 측정장치에 외란이 들어오는 고장, 측정장치의 이득변화에 의한 bias가 발생하는 고장, 측정장치에 들어오는 잡음

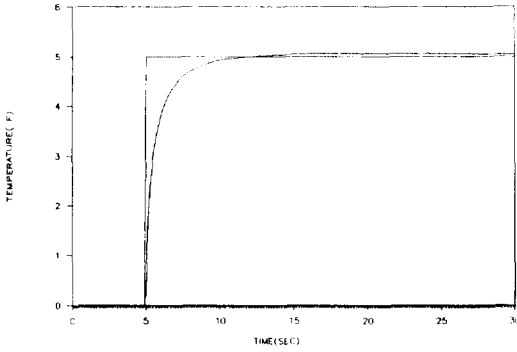


그림 6 노심냉각재온도 측정장치 고장시 고장추정
 Fig. 6 Estimate of primary fluid temperature sensor fault

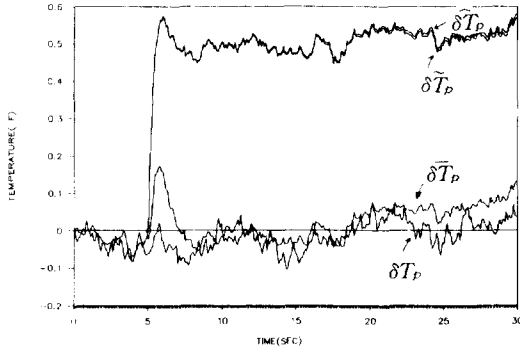


그림 7 노심냉각재온도 측정장치 고장시 노심냉각재 온도의 추정
 Fig. 7 Primary fluid temperature sensor fault ; estimate of primary fluid temperature

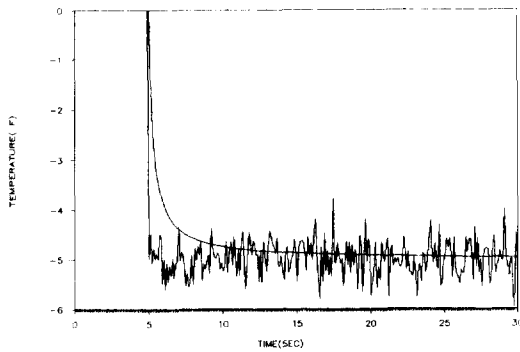


그림 8 금속튜브온도 측정장치 고장시 고장추정
 Fig. 8 Estimate of metal tube temperature sensor fault

이 갑자기 증가하는 고장을 들 수 있다.

노심냉각재온도 측정장치에서 5초에 스텝형태의 고장이 발생하였을 때를 고려하자. 측정장치 이득 변화로 갑자기 측정치에 5°F의 값이 더해진다고 가정한다. 그림 6은 SFBE에 의한 고장크기 추정치, 그림 7은 노심냉각재 온도의 변화를 추정한 것으로서 SFBE에 의한 상태추정치는 상태변수를 잘 추정하나 칼만필터의 상태추정치와 PFBE의 상태추정치는 오차가 큰것을 알 수 있다. 따라서 측정장치에 고장이 발생하여도 제어에 필요한 상태 정보는 보상된 상태추정치를 이용할 수 있으므로 측정장치고장에도 불구하고 측정장치의 즉각적인 교체없이 제어가 가능하다.

금속튜브온도 측정장치의 지침이 상태치보다 5°F 적은 값으로 고정된 고장을 고려하자. 그림 8은 SFBE에 의한 고장크기 추정치, 그림9는 금속

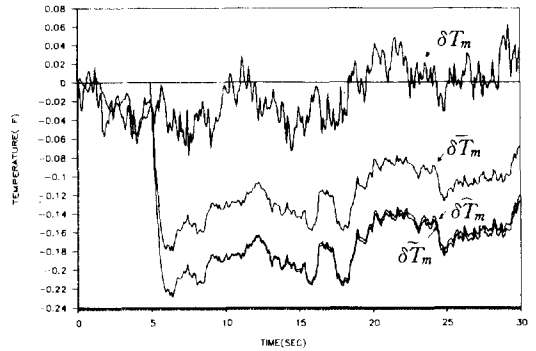


그림 9 금속튜브온도 측정장치 고장시 튜브금속 온도의 추정
 Fig. 9 Metal tube temperature sensor fault ; estimate of metal tube temperature

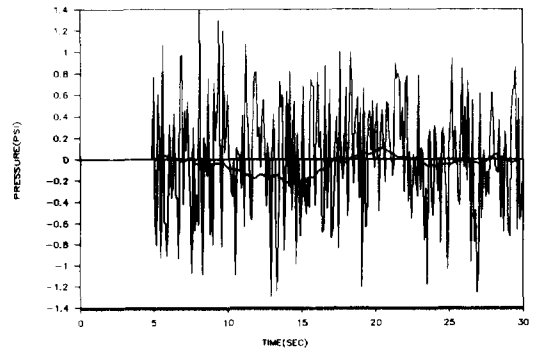


그림 10 증기압력 측정장치 고장시 고장추정
 Fig. 10 Estimate of steam pressure sensor fault

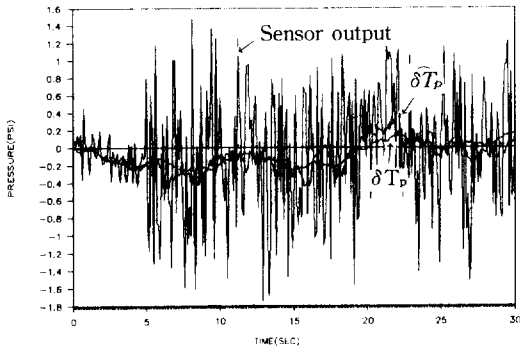


그림 11 증기압력 측정장치 고장시 증기압력, 측정장치출력, 칼만필터의 추정치의 비교
Fig. 11 Steam pressure sensor fault ; comparison of steam pressure, sensor output and Kalman filter estimate

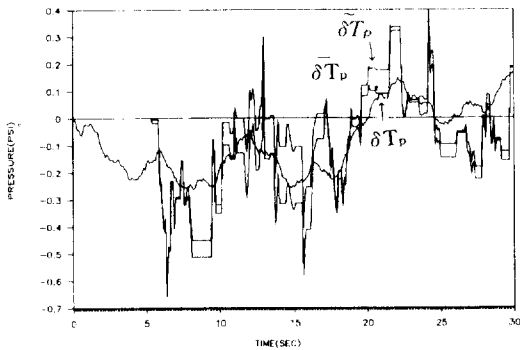


그림 12 증기압력 측정장치 고장시 증기압력의 추정
Fig. 12 Steam pressure sensor fault ; estimate of steam pressure

튜브온도를 추정한 것으로 SFBE에 의한 상태추정치는 대략 0.1°F의 오차를 수반하고 있고 칼만필터와 PFBE에 의한 상태추정치는 대략 0.2°F의 오차를 갖고 있음을 보여주고 있다.

증기압력 측정장치에서 갑자기 잡음이 증가한 경우를 고려하자. 정상상태중에는 잡음의 표준편차를 0.2psi로 주었으나 5초부터 0.8psi의 표준편차를 갖는 잡음이 들어온다고 가정하였다. 그림10은 SFBE에 의한 고장크기 추정치, 그림11은 증기압력의 변화, 이에 대한 측정장치의 출력, 칼만필터에 의한 추정치를 보여주고 있다. 비록 측정장치에 잡음이 크게 증가하여도 칼만필터는 상태추정치를 추정하는데 별문제가 없음을 알 수 있다. 마지막으로 그림12는 PFBE와 SFBE에 의해 상태

변수 추정치를 나타내고 있다. 그림에서 상태추정치가 잡음의 영향으로 크게 맥동하는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

원자력발전소의 안전성과 신뢰도를 향상시키기 위한 대책으로서 원자로운전중 발생할 수 있는 계통고장과 운전특성에 직간접적으로 영향을 미칠 수 있는 측정장치의 고장을 검출하고 진단할 수 있는 고장검출 및 진단계통의 설계방법을 제안하고 이를 PWR증기발생기에 적용하였다.

증기발생기계통에서 발생가능한 많은 고장중 중요하다고 판단되는 노심출구관 온도변화, 급수히터고장, MSCV고장등 계통고장과 측정장치고장을 고려하였다. 제안된 고장검출 및 진단기법은 계통고장과 측정장치고장을 함께 고려할 수 있으며, 기존기법에 비해 속응성이 있어 비교적 빠른 응답특성을 갖는 계통에도 적용가능하다. 시뮬레이션의 일차적 목적을 준정상 상태에서의 고장검출 및 진단에 두었으므로 제어는 고려하지 않았으나 출구관온도의 변화와 같이 고장이 치명적이지 않은 경우에는 고장변수의 추정치를 이용하여 제한제어입력을 보정함으로써 고장발생시에도 불구하고 원하는 제어목적을 달성할 수 있는 소위 FTCS(fault tolerant control system)의 구성이 가능할 것으로 판단된다.

이 연구는 89년도 한국과학재단 연구비 지원에 의한 결과임

참 고 문 헌

- [1] R.N. Clark, "Instrument fault detection," IEEE Trans. Aero. and Elec. Sys., Vol. AES ~14, pp. 456~465, 1978
- [2] J.L. Tylee, "A generalized likelihood ratio approach to detecting and identifying failure in pressurizer instrumentation," Nucl. Technol., Vol. 56, pp. 484~492, 1982
- [3] M.A. Massoumnia, "A geometric approach to the synthesis of failure detection filters," IEEE Trans. Auto. Contr., Vol. AC~31, No.9, pp. 839~846, 1986
- [4] B. Friedland, "Multidimensional maximum

- likelihood failure detection and estimation," IEEE Trans. Auto. Contr., Vol. AC-26, pp. 567~570, 1981
- [5] B. Frieland, "Notes on separate~bias estimation," IEEE Trans. Auto. Contr., Vol. AC~23, pp. 735~738, 1978
- [6] J.D. Freels, "An investigation of high order and low order dynamic modelling of a complete pressurized water reactor nuclear power plant," MS Thesis The University of Tennessee, 1979
- [7] 박승엽, "원자로계통의 고장검출 및 진단에 관한 연구," 박사학위논문, 고려대학교 대학원, 1987