

비선형 보일러 시스템에서의 이상허용제어

Fault Tolerant Control for Nonlinear Boiler System

윤 석 민, 김 대 우, 이 명 의, 권 오 규

(Seok-Min Yoon, Dae-Woo Kim, Myung-Eui Lee, O-Kyu Kwon)

Abstract : This paper deals with the development of fault tolerant control for a nonlinear boiler system with noise and disturbance. The MCMBPC(Multivariable Constrained Model Based Predictive Control) is adopted for the control of the specific boiler turbin model. The fault detection and diagnosis are accomplished with the Kalman filter and two bias estimators. Once a fault is detected, two Bias estimators are driven to estimate the fault and to discriminate process fault and sensor fault. In this paper, a fault tolerant control scheme combining MCMBPC with a fault compensation method based on the bias estimator is proposed. The proposed scheme has been applied to the nonlinear boiler system and shown a satisfactory performance through some simulations.

Keywords : fault detection, fault isolation, fault tolerant control, model-based predictive control, bias estimator.

I. 서론

신뢰성(reliability), 가용성(availability), 안전성(safety) 등은 자동화와 대형화로 특징지을수 있는 현대 산업용 시스템에 있어서 추구하는 최종적인 목표라고 말할 수 있다. 이런 경향에 비추어 대형 시스템의 고장으로 인한 운전 정지는 막대한 손실을 야기시키므로 공정의 안정성 및 신뢰도의 수준이 더욱 더 높아지게 되었다. 따라서 제어시스템의 안정성 및 제어능을 유지하도록 시스템을 구성하는 제어기법이 요구되고 있으며 이상허용제어기법은 그중 한 가지 해답으로 여겨지고 있다[1].

이상허용 제어는 현대제어 및 여러 가지 예측기법들이 관련된 광범위한 연구분야로서 원자로나 전력계통 및 전략 무기체계 등 각종 대형 및 고가의 공정이나 시스템의 감시 제어장치 등에 활용될 수 있다. 이상 허용제어에서 시스템의 초기이상 상황을 정확하고 신속하게 검출·진단하는것은 심각한 고장으로 확대될 위험을 최소화시키며 고장발생시에 따른 보수비를 절감하는것등과 밀접한 관계가 있다. 이상허용제어기법의 구성법은 하드웨어적 여유도(hardware redundancy)를 늘이는 방법과 소프트웨어적 여유도(software redundancy)를 늘리는 방법등이 있는데, 하드웨어적 여유도(redundancy)를 늘리는 방법은 이상허용제어에 있어서 초기에 사용되던 방법으로써 시스템이 복잡해지고 비용부담이 커지게 되는반면, 최근에는, 제어기와 구동기, 센서들의 특성이나 해석적 모델을 이용하여 각 부분의 이상을 진단하면서 이에 상응하는 조치를 수행하는 소프트웨어적 여유도를 늘리는 방법을 통해 신뢰도를 향상시키는 방향이 선호되고 있다[2]. 이 논문에서는 기존의 이상 진단법의 단점으로 지적 되고 있는 하드웨어적 복잡성과 많은 계산량을 지양하고, 필터를 이용하여 이상 검출과 센서 및 구동기이상을 진단하는 알고리즘을 구성하여 모의실험을 통해 구현한다. 또한 이를 기반으로 대표적인 비선형 공정으로 모델 불확실성, 외란, 시간지연 및

제약조건을 가진 다변수 시스템인 비선형 보일러 시스템에 대해서 구동기 이상과 측정 장치 이상 발생시에도 제어 성능을 유지하는 이상허용제어기법을 제시한다.

보일러를 최적의 상태로 운전하고 전력 계통의 원활한 운용을 위한 자동제어 장치 기술 개발 및 효율적인 운전 등을 수행하면 불필요한 에너지의 낭비를 막을 수 있다. 발전용 보일러와 같은 대형 시스템의 경우 정상적인 운전 상태에서의 최적운용도 중요하지만 이에 못지 않게 대상 시스템에 이상이 발생하였을 때 이에 대한 대책을 마련하는 것도 매우 중요한 과제이다[1][3]. 발전용 보일러는 화력 발전시설의 중요부로서 요구되는 만큼의 전력을 발생할 수 있도록 증기를 발생시키는 것이 주된 제어목적이다. 전력보일러 계통에서 이상 상황 발생으로 부득이하게 운전을 정지하게 되면 전력의 원활한 공급에 큰 차질을 빚게 되고 이로 인해 막대한 경제적 손실을 유발할 수 있기 때문이다. 이러한 문제의 해결 방법의 하나로 이상허용 제어 기법을 들 수 있다. 이상허용제어란 이처럼 대상 시스템에 이상이 발생하였을 때에도 안정도 및 제어성능을 유지하도록 시스템을 구성하는 제어기법을 뜻한다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제어기로서 Clarke 등이 제안한 예측제어기법[4][5][6]의 개략적인 알고리즘을 고찰한다. 예측제어기법은 다변수 시스템에서 기존의 PID 제어기보다 조정계수가 훨씬 적어 조정이 용이할 뿐만 아니라 입출력 결합정도에 관계없이 적용이 가능하다. 특히 제약조건 및 포화특성이 있는 시스템에도 확장할 수 있는 장점을 갖고 있다. 실제적으로 보일러는 구동기의 물리적 또는 동적 제한성과 비선형성 등으로 인해 입출력에 대해서 제한적인 요소가 존재하게 되는데 이러한 제약 조건들을 만족시키기 위해 Wilkinson 등이 제안한 제약조건을 고려한 예측제어기법(MCMBPC : Multivariable Constrained Model Based Predictive Control)[10] 알고리즘을 사용한다. 3장에서는 이상 발생시 이상의 크기를 추정하고 구동기 이상과 센서 이상을 구별하기 위한 편향(bias) 추정기법을 정리한다. 4장에서는 2장과 3장에서 각각 제시한 MCMBPC와 바이어스 추정기를 이용해 이상

이 발견되었을 때 비정상 제어입력을 최적화 시킴으로써 이상 발생시에도 불구하고 제어목적은 달성할 수 있는 이상허용제어기를 구성하여 모의실험을 통해 성능을 확인하며 마지막으로 5장에서는 결론을 맺는다.

II. 제약조건을 고려한 다변수 모델예측제어

1. 공정 모델

이 논문에서는 비선형보일러 시스템의 제어기로서 예측제어기를 사용한다[4][5][6]. 보일러시스템의 동특성을 선형화하여 상태공간모델로 나타내면 앞먹임 항인 \bar{D} 가 존재하는데 예측제어 알고리즘을 써서 제어기를 구성할 때에는 이 항이 있으면 제어기를 설계하기가 곤란하므로, 시스템의 전단에 적분기를 첨가한 형태로 적절히 변형시킨 확장된 시스템을 이용하여 제어기를 설계한다.

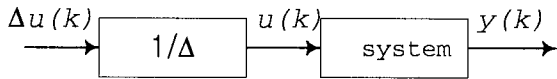


그림 1. 확장 시스템.

Fig. 1. Augmented system.

여기서, 차분 연산자 Δ 는 $1-q^{-1}$ 로 정의되며, 또한 q^{-1} 은 지연 연산자(backward shift operator)를 나타낸다. 보일러 공정모델을 외란과 잡음이 존재하고, 다변수인 경우로 확장하면 다음과 같은 이산시간 상태공간 모델식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + B\Delta u(k) + Gw(k) \\ y(k) &= Cx(k) + Rv(k) \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} x(k) &= \begin{bmatrix} \bar{x}(k) \\ u(k) \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} \bar{A} & \bar{B} \\ 0 & I \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \\ C &= [\bar{C} \quad \bar{D}], \quad G = \begin{bmatrix} \bar{G} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad R = \bar{R} \end{aligned}$$

여기서, u 와 y 는 공정입력 및 출력 벡터, x 는 시스템의 상태벡터, v 와 w 는 정규 백색 측정잡음과 외란을 나타낸다. $\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}, \bar{D}$ 그리고 \bar{G}, \bar{R} 은 모델의 계수행렬이다. (2.1)의 변형된 시스템 표현식에서는 출력방정식에 입력항이 나타나지 않음을 알 수 있다.

2. 모델 예측 제어

모델 예측제어기 문제는 외란과 잡음이 존재하는 시스템에 대해 다음과 같은 가격함수를 최소화하는 제어입력을 찾는 문제이다.

$$J = \sum_{j=N_1}^{N_2} [r(k+j) - y(k+j)]^2 + \lambda \sum_{j=0}^{N_u-1} [\Delta u(k+j)]^2 \quad (2.2)$$

여기서, N_1, N_2 는 예측구간, N_u 는 제어구간, λ 는 제어증분에 대한 가중치, r 는 기준입력으로 정의한다. (2.2)의 가격함수를 벡터형식으로 표현하면 다음과 같다.

$$J = (r - \hat{y})^T (r - \hat{y}) + \lambda \Delta u^T \Delta u$$

$$\begin{bmatrix} r = [r(k+N_1) \cdots r(k+N_2)]^T \\ \hat{y} = [\hat{y}(k+N_1) \cdots \hat{y}(k+N_2)]^T \\ \Delta u = [\Delta u(k) \cdots \Delta u(k+N_u-1)]^T \end{bmatrix}$$

모델예측제어기는 확장된 시스템의 상태공간 모델(2.1)으로부터 유도된다. j 번째 예측자는 y 에 기대값을 취하고 $E(v)=0$ 과 $E(w)=0$ 임을 이용하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\hat{y}(k+j) = CA^j \hat{x}(k) + \sum_{i=0}^{j-1} CA^{(j-i-1)} B \Delta u(k+i) \quad (2.3)$$

여기서, x 의 기대값 대신에 칼만필터로부터 구한 상태추정 벡터 \hat{x} 이 사용된다.

$$\begin{aligned} \bar{x}(k) &= A\hat{x}(k-1) + B\Delta u(k-1) \\ \hat{x}(k) &= \bar{x}(k) + L[y(k) - C\bar{x}(k)] \end{aligned} \quad (2.4)$$

칼만필터는 시스템의 실제상태 벡터와 상태추정 벡터간의 오차 분산 값을 최소화함으로써 설계되고, 여기서 L 은 칼만필터 이득행렬이다. 출력예측 벡터는 다음과 같은 행렬을 이용해 계산된다.

$$\hat{y} = F\hat{x}(k) + H\Delta u(k) \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} F &= \begin{bmatrix} CA^{N_1} \\ \vdots \\ CA^{N_2} \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} h_{N_1,1} & \cdots & h_{N_1,N_u} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_2,1} & \cdots & h_{N_2,N_u} \end{bmatrix}, \\ h_{j,i} &= \begin{cases} CA^{j-i}B & j \geq i \\ 0 & j < i \end{cases} \end{aligned} \quad (2.6)$$

(2.5)에서 제어입력이 변화하지 않고 일정한 값을 갖는 경우 즉, 제어증분이 0일 때의 예측출력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f = F\hat{x}(k) \quad (2.7)$$

(2.5)와 (2.7)을 (2.2)에 대입하면 다음과 같은 이차형 최소화 문제를 얻을 수 있다.

$$J(\Delta u) = \Delta u^T [H^T H + \lambda I] \Delta u - 2(r-f)^T H \Delta u + (r-f)^T (r-f) \quad (2.8)$$

2.1 제약조건이 없는 경우

위 (2.8)과 같은 이차형 성능지표의 최소화문제에서 최소제곱법을 사용함으로써 제약조건이 없는 경우에는 해를 쉽게 구할 수 있다.

$$\Delta u = (H^T H + \lambda I)^{-1} H^T (r-f) \quad (2.9)$$

또한, 모델 예측 제어에서는 위 식에서 구한 제어증분 중에서 단지 첫 번째 요소만을 필요로 하기 때문에 실제 제어입력은 다음과 같이 나타낼 수 있다 [4].

$$u(k) = u(k-1) + (I \ 0 \ \cdots \ 0) \Delta u \quad (2.10)$$

2.2 제약조건을 갖는 경우

제약조건을 갖지 않는 공정의 경우 앞서 제시한 모델 예측제어기만으로도 만족스러운 결과를 얻을 수 있지만 실제적으로 대부분의 공정들은 여러 가지 제약조건이 따르기 마련이다. 따라서 단순한 예측제어기만으로는 효과적인 제어를 기대하기가 힘들다. 따라서 제약조건을 고려해 시스템이 가지는 모든 제약조건을 만족함과 동시에 (2.8)로 주어지는 성능지표를 최소로 만드는 해를 구하도록 예측제어기를 구성해야 한다. 결국 최적화문제는 다음과 같은 선형부등식의 최소제곱문제(LSI: Least Square with Inequality Constraints Problem)로 나타낼 수 있다.

제약조건을 갖는 경우에 (2.8)의 최적화 문제는 다음과 같은 선형 부등식의 최소제곱문제로 나타낼 수 있다.

$$\text{Min} \| \Gamma x - b \|, \quad \text{s.t. } \gamma x \geq h \quad (2.11)$$

여기서

$$\Gamma = \begin{bmatrix} H \\ \lambda^{1/2} I \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} r - f \\ 0 \end{bmatrix}, \quad x = \Delta u \quad (2.12)$$

이고, γ 는 제약조건들에 대한 동적 정보를, h 는 제약조건들에 대한 제한값들을 나타낸다. (2.11)의 놈 최소화 문제를 여기서는 특이치분해를 이용해서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$x = (\Gamma^T \Gamma)^{-1} \Gamma^T b = V \Sigma^{-1} U^T b \quad (2.13)$$

이렇게 구한 해가 주어진 제약조건을 만족하지 못하면, LSI문제는 최단거리 계획(least distance programming)문제로 변환시켜야 한다. Γ 의 분할된 특이치분해가

$$\Gamma = U \begin{bmatrix} S & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} V^T = [U_1 \ U_2] \begin{bmatrix} S \\ 0 \end{bmatrix} V^T, \quad (2.14)$$

$$S = \text{diag}(s_1, \dots, s_r)$$

와 같다고 하면, LSI의 비용함수는

$$\| b - \Gamma x \|^2 = \left\| \begin{bmatrix} U_1^T b \\ U_2^T b \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} S y \\ 0 \end{bmatrix} \right\|^2 = \| \bar{b}_1 - S y \|^2 + \| \bar{b}_2 \|^2 \quad (2.15)$$

와 같이 쓸수있다.

위 식에서 $\| \bar{b}_2 \|^2$ 을 제외하면 LSI문제는 다음의 LDP문제와 같게 된다.

$$\text{Min} \| z \|, \quad \text{s.t. } \bar{\gamma} z \geq \bar{h} \quad (2.16)$$

여기서, $\bar{\gamma} = \gamma VS^{-1}$, $\bar{h} = h - \bar{\gamma} \bar{b}_1$ 이며, LDP문제를 풀기 위해서는 첫째로 다음과 같은 NNLS (Non-Negative Least Squares) 문제를 먼저 해결하여야 한다.

$$\text{Min} \| Qd - g \|, \quad \text{s.t. } d \geq 0 \quad (2.17)$$

여기서, $Q = \begin{bmatrix} \bar{\gamma}^T \\ \bar{h}^T \end{bmatrix}$, $g = [0 \ \dots \ 0 \ 1]^T$ 을 나타내며 다음과 같은 잔차벡터 α 를 이용하여 LDP문제의 해 z_i 가 구

해지게 된다.

$$\alpha = Qd - \gamma, \quad \gamma \in R^{(n+1) \times 1} \\ z_i = -\alpha_i / \alpha_{n+1}, \quad i = 1, \dots, n \quad (2.18)$$

마지막으로 (2.18)을 이용하여 원래의 LSI문제의 해를

$$x = \Delta u = VS^{-1}(z + \bar{b}_1) \quad (2.19)$$

와 같이 구해낼 수 있다. 결과적으로 제어입력은 모든 제약조건이 만족될 경우에만 공정으로 보내지게 된다.

III. 이상 검출 및 진단

1. 문제설정

정상상태에서 (2.1)과 같이 표현되는 선형계통에서 구동기와 측정장치 이상으로 인해 발생하는 바이어스를 고려한 선형계통이 다음과 같다고 하자.

$$x(k+1) = Ax(k) + B\Delta u(k) + F_a b + Gw \\ y(k) = Cx(k) + F_s b + Rv \quad (3.1)$$

여기서, b 는 이상벡터이고, 동시에 발생하지 않는다고 가정할 때, F_a 와 F_s 는 각각 구동기와 측정장치에 영향을 미치는 경로를 나타내며 실험적 정보 혹은 설계자에 의해 결정될 수 있다.

2. 이상검출

이상검출에는 예측제어기를 구성할 때 사용되는 칼만 필터의 필터편차 (r)를 이용한다.

$$r(k) = y(k) - C\hat{x}(k) \quad (3.2)$$

정상상태에서 N 개의 필터 편차 샘플치에 대한 평균 임계값을 구하면 다음과 같다.

$$MT_i(k) = \sum_{j=k-N+1}^k \frac{r_i(j)}{N}, \quad i=1,2,\dots,m \quad (3.3)$$

정상상태시 이 값은 일정범위내의 값이 되지만 이상이 발생하면 계통의 정상 운전중의 자료에 의해 결정된 필터 편차의 최대값, 최소값을 벗어나게 된다. 따라서, $MT_i(k)$ 가 계통으로부터 적절히 선정된 문턱값보다 크면 이상판단을 하게 된다.

3. 이상진단

이상발생시 이상의 종류와 크기를 진단하기 위해서 편향(bias)추정기[7][8]를 사용해 이상벡터를 추정하며, 편향추정기 구조는 다음식과 같다.

$$\hat{b}(k) = [I - G(k)S(k)] \hat{b}(k-1) + G(k)r(k) \quad (3.4)$$

여기서, $G(k)$ 는 편향 이득행렬이고, F_s 는 센서이상, F_a 는 구동기 이상에 대한 부분이다.

$$G(k) = M(k+1)[C(k)V(k) + F_s^T R(k)]^{-1} \quad (3.5)$$

$$S(k) = C(k)U(k) + F_s \quad (3.6)$$

$$V(k) = U(k) - L(k)S(k) \quad (3.7)$$

$$U(k+1) = A(k)V(k) + F_a \quad (3.8)$$

그리고, 편향 상호분산 행렬은 다음과 같다.

$$M(k+1)^{-1} = M(k)^{-1} + S(k)^T [C(k)P(k)C(k)^T + R(k)]^{-1} S(k) \quad (3.9)$$

3. 구동기 이상과 측정장치 이상의 구별

모의실험을 실시한 결과 그림 3과 그림 6을 비교해보면 알 수 있듯이, 보일러에서는 구동기 이상 혹은 측정장치 이상시 응답 경향이 유사하므로 출력신호만으로 이것이 구동기 이상인지 측정장치 이상인지 판가름하기가 어렵다. 따라서, 여기서는 구동기이상과 측정장치 이상을 구별하고 진단하기 위해서 2개의 편향 추정기를 사용한다. 하나는 구동기 이상에 대해 또 다른 하나는 센서 이상에 대한 것이다. AFB (Actuator Fault Bias estimator)는 검출된 이상이 구동기 이상에 의한 것이라는 가정하에 편향을 추정하며, SFB(Sensor Fault Bias estimator)는 검출된 이상이 센서 이상에 의한 것이라는 가정하에 이상을 추정한다. 이때 AFB의 경우는 편향 추정기를 $F_s = 0$ 으로, SFB의 경우에는 $F_a = 0$ 으로 하고 설계한다. 만일 구동기에 이상이 발생하였다면 ($F_s = 0$), AFB는 실제시스템의 출력과 거의 같고, SFB의 출력추정치는 실제시스템의 출력과 차이가 있으며(그림 2), 측정장치 이상의 경우엔 ($F_a = 0$) 그 출력의 증상은 구동기의 경우와 반대가 된다. 그림 2는 급수조절기의 이상이 발생했을 때 그림 5의 상태 변수 (x_3)를 추정한 것으로, AFB에 의한 상태 추정치는 상태변수를 잘 추정하나 칼만필터의 상태추정치와 SFB에 의한 상태 추정치는 오차가 큰 것을 알 수 있다. 따라서 나머지 이상들도 이와 같은 방법으로 구동기 이상과 측정장치 이상을 구별할 수 있다.

IV. 이상허용제어

MCMBPC와 편향 추정기를 사용한 이상허용제어를 산업용 보일러 모델에 적용한다. 보일러 터빈 비선형 모델은 Astrom 등에 의해 드럼압력, 전기적출력, 드럼수위를 예측하기 위해 제안한 160 MW급 모델[9]이며 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -0.0018u_1x_1^{9/8} + 0.9u_1 - 0.15u_3 \\ \dot{x}_2 &= [(0.73u_2 - 0.16)x_1^{9/8} - x_2]/10 \\ \dot{x}_3 &= [141u_3 - (1.1u_2 - 0.19)x_1]/85 \\ \dot{x}_4 &= (acs - x_4) - x_5/10 \\ \dot{x}_5 &= [1000(acs - x_4) - x_5]/10 \\ \dot{x}_6 &= (u_3 - x_6)/20 \\ \dot{x}_7 &= [(3.55(1.1u_2 - 0.19)x_1 - x_7)]/20 \\ acs &= \frac{(1 - 0.001538x_3)(0.8x_1 - 25.6)}{x_3(1.0384 - 0.0012304x_1)} \\ qe &= (0.85u_2 - 0.147)x_1 + 45.59u_1 - 2.514u_3 - 2.096 \end{aligned} \quad (4.1)$$

그리고, 출력은 다음과 같다.

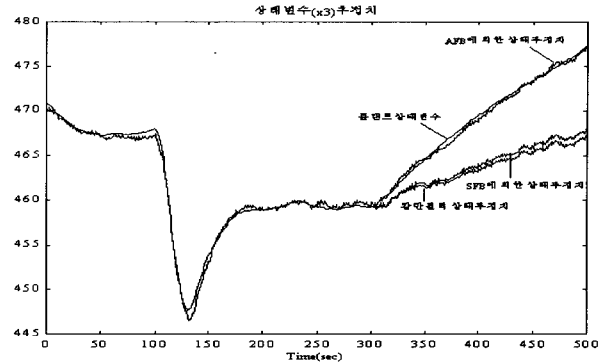


그림 2. 급수조절기 이상시 상태변수, 칼만필터 추정치, 바이어스 추정치의 비교.

Fig. 2. Comparison of state variable, estimated by Kalman filter, estimated by Bias estimator in the case of feedwater valve fault.

$$\begin{aligned} y_1 &= x_1 \\ y_2 &= x_2 \\ y_3 &= 0.05(0.13073x_3 + 100acs + qe/9 - 67.975) \end{aligned}$$

여기서, 상태변수 x_1, x_2, x_3 는 각각 드럼 증기압력 [kg/cm^2], 전기적 출력 [MW], 그리고 드럼내의 유체의 밀도 [kg/m^3]를 나타낸다. y_3 는 드럼수위(m), acs는 증기의 질(quality), qe는 증발률(evaporation rate)을 각각 나타낸다. u_1, u_2, u_3 는 각각 보일러 연료조절기의 위치, 터빈으로의 증기의 양 조절 밸브 위치, 급수 조절기의 위치를 나타내고 이값들은 모두 정규화된 값들이다. 그리고 구동기의 크기 및 변화율에 대한 제약조건은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} | \Delta u_1 | &\leq 0.007 / \text{sec} & 0 < u_1 < 1 \\ -2 / \text{sec} &\leq \Delta u_2 \leq 0.2 / \text{sec} & 0 < u_2 < 1 \\ | \Delta u_3 | &\leq 0.05 / \text{sec} & 0 < u_3 < 1 \end{aligned}$$

여기서, 제어기는 비선형모델로부터 직접 구할 수 없기 때문에 특정 동작점에서 공정을 선형화 시킨다. 이 논문에서 사용한 보일러 모델의 공칭 동작점은 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x^0 &= [118.8 \ 85.063 \ 470.8]^T, \\ u^0 &= [0.4182 \ 0.7590 \ 0.5434]^T, \\ y^0 &= [118.8 \ 85.063 \ 0.322]^T \end{aligned}$$

1. 구동기 이상의 경우

보일러에서의 구동기 이상은 입력측인 연료조절기, 증기량 조절밸브, 급수 조절기에서의 이상으로 판이 막히거나 덜 열린 경우를 들 수 있다. 이상이 발생했을 때 제어기는 이상정보를 알지 못하므로 기준입력을 추종하지 못하게 된다. 그러므로 이상 크기와 종류를 진단하여 제어기에 이상정보를 알려주어 (2.10)을 다시 계산해 제어이득을 구해야 한다. 즉, 예측제어기에서 Δu 가 변하지 않을 때 출력 y 를 구하는 (2.7)에서 칼만필터 상태추정치에 (4.2)와 같이 이상정보를 보상해 주어야 한다.

$$f = F(\hat{x}(k) + V\hat{b}) = F\hat{x}(k) \quad (4.2)$$

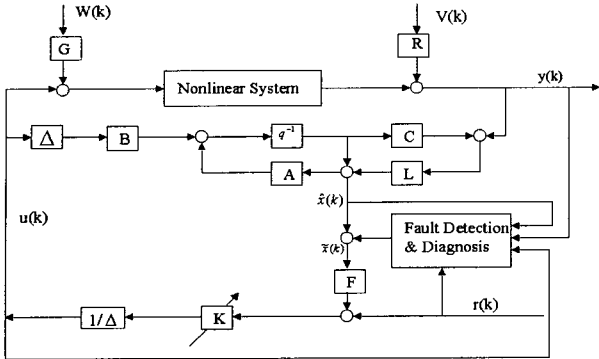
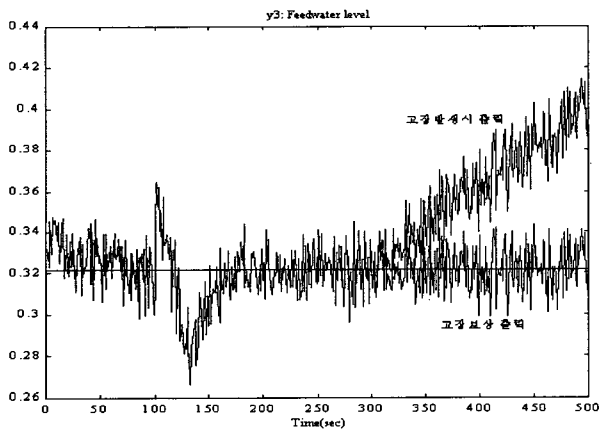
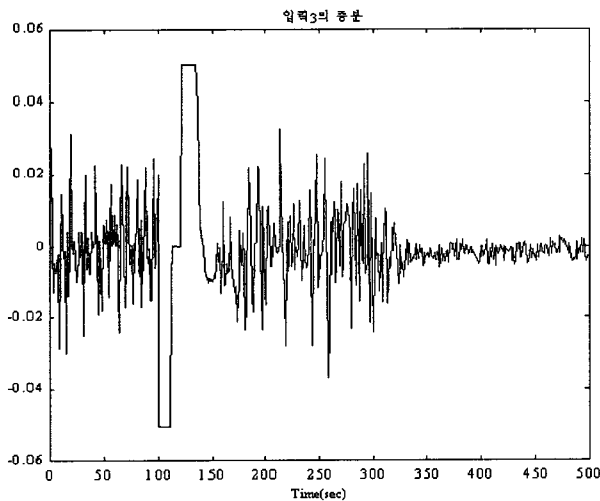


그림 3. 예측제어기를 이용한 이상허용제어.
Fig. 3. Fault tolerant control system using MCMCPC.



(a) 드럼수위

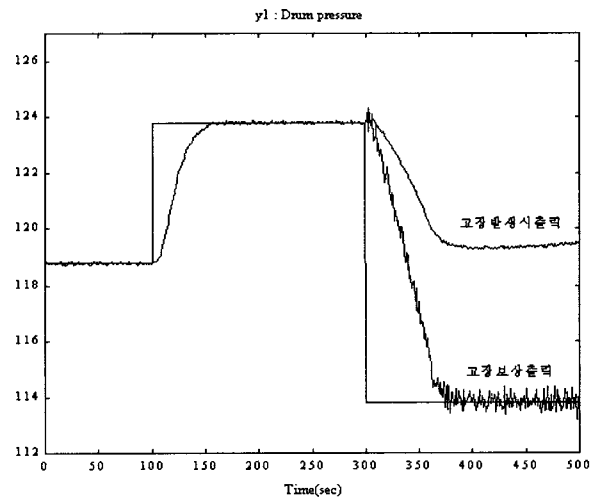


(b) 이상발생시 입력 3의 증분

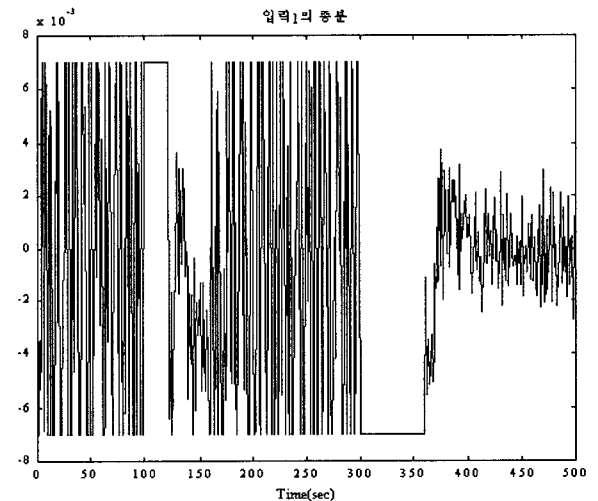
그림 4. 급수 조절기 이상시 보일러출력과 제어증분.
Fig. 4. Output and control increment in case of fault in feedwater valve.

급수 조절기가 이상으로 인해 50%만 열렸을 때의 이상 출력과 이상 허용제어기 출력 그림 4는 다음과 같다.

정상상태일 때 이상이 발생하면 y_1 은 제어기내에서 자체보상이 되기 때문에 y_1 에 대해선 그림 6과 같이 기준 입력이 변할 때 보일러 연료조절기에 이상이 발생해 57%밖에 열리지 않았을 경우를 고려한다. 이상 발생시 보일러출력은 기준입력을 전혀 따라가지 못하는 반면 이상정보를 제어기에 투입한 이상 보상 제어기는 기준입력을 잘 추종하는 것을 볼 수 있다.



(a) 드럼 증기 압력



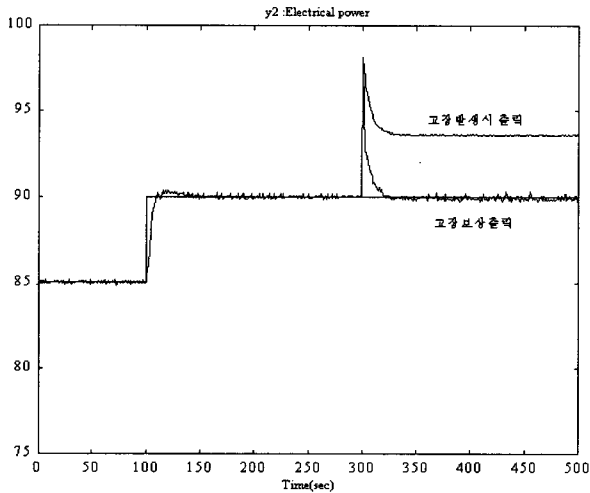
(b) 이상발생시 입력 1의 증분

그림 5. 연료 조절기 이상시 보일러 출력, 제어증분.
Fig. 5. Output and control increment in case of fault in fuel valve.

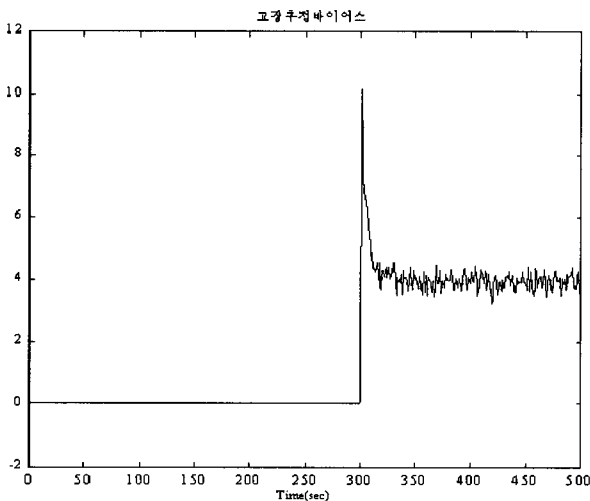
2. 측정장치 이상의 경우

측정장치의 경우 발생할 수 있는 이상으로 측정장치에 외란이나 잡음이 갑자기 증가하는 이상, 측정장치 의 이득

변화에 의한 바이어스가 발생하는 이상 등을 들 수 있다. 측정장치 이상에 대비한 입력보상은 출력의 측정치에 이상량 추정치 \hat{b} 를 더하거나 빼는 것으로 가능하다. 전기적 출력 측정장치의 출력치에 8[MW]의 값이 더해진다고 가정했을 때의 결과는 다음 그림 6과 같다.



(a) 전기적 출력



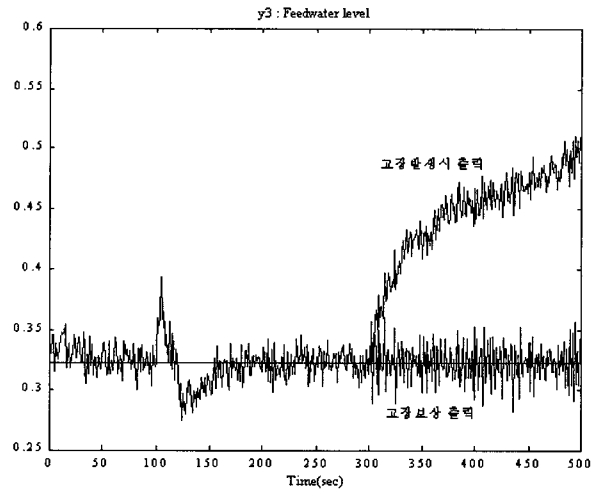
(b) 이상추정바이어스

그림 6. 전기적출력 측정장치 이상시 출력과 추정바이어스.

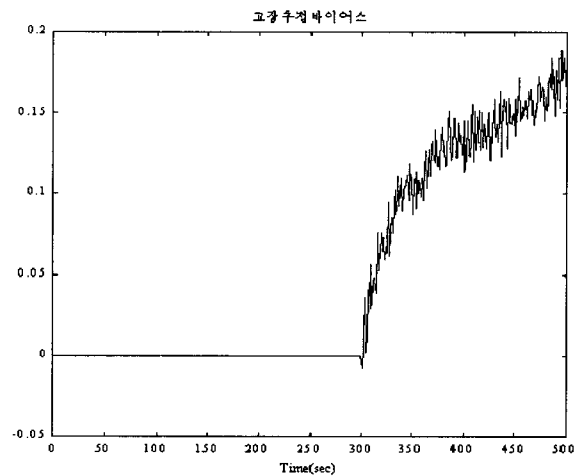
Fig. 6. Output and estimate of fault in case of electrical fower sensor fault.

그림 6(a)에서 보이는 바와 같이 제어기 특성상 어느정도 보상이 되지만 기준입력을 따라가지는 못한다. 그러나 그림 6(b)에서 보이는 것처럼 이상크기를 추정해서 출력치에 보상을 해주면 그림6(a)의 이상보상출력처럼 기준입력을 잘 추종하는 것을 볼 수 있다. 그림 7은 드럼 수위 측정장치의 측정치에 초당 0.0035(m)씩 증가하는 이상을 고려한 경우이다. 그림들에서 보듯이 제어기 내에서 어느정도 보상이 되는 경우도 있지만 입력 제약조건 때문에 기준 입

력을 추종하진 못한다. 그러나 이 논문에서 제시한 기법은 제어에 필요한 상태정보를 제어기내에 투입함으로써 구동기 이상과 측정장치 이상에도 불구하고 기준입력을 잘 추종하는 것을 볼 수 있다.



(a) 드럼 수위



(b) 이상추정바이어스

그림 7. 드럼수위 측정장치 이상시 출력과 추정 바이어스.

Fig. 7. Output and estimate of fault in case of fault in drum level sensor fault.

V. 결론

이 논문에서는 보일러의 안전성과 신뢰도를 향상시키기 위한 대책으로서 구동기이상과 측정장치이상에 대한 이상보상추정기를 도입하여 이상을 검출·진단하고 동시에 제어가 가능한 이상허용 제어기법을 제안하여 적용하였으며 이를 비선형 보일러에 적용하여 그 성능을 검증하였다. 제안된 기법은 이상이 치명적이 아닌 경우에 이상변수 추정치를 이용해 되먹임제어입력을 보정함으로써 이상 발생시에도 원하는 제어성능이 유지됨을 모의실험을 통해 확인하였다. 이 논문에서 사용한 이상검출 및 진단기법이

구동기 이상과 센서 이상을 구별할 수 있고 또한, 속응성이 있어 비교적 빠른 응답특성을 갖는 계통에도 적용 가능할 것으로 판단된다. 차후 과제로 모델 불확실성이 존재하는 경우 즉, 건설한 이상 검출 및 진단법 또는 건설한 이상허용제어 기법이 연구되어야 한다고 생각하며, 실제 보일러 시스템에 적용할 때는 증기온도, 급수와 증기밀 도 등을 고려한 연구가 병행되어야 한다

참고문헌

[1] R. Isermann, "Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing- Tutorial paper," *Automatica*, 29, 815-835, 1993.
 [2] R. J Patton, "Fault tolerant control: the 1997 situation(survey)", *IFAC Safe Process*, 1033- 1055, vol 2, 1997.
 [3] O. K. Kwon, D. W. Kim, and Y.S. Kim "Robust on-line fault detection method for boiler systems", 제어·자동화·시스템공학회 논문지 제5권, 제1호, 1999. 1.
 [4] D. W. Clarke, C. Mohtadi, and P. S. Tuffs, "Generalized predictive control Parts 1 and 2," *Automatica*, 23, 137- 160, 1987
 [5] J. M. Dion, L. Dugard, and M. T. Nguyen, "MIMO adaptive generalized predictive control with input-output constraints," *Proc. of ADCHEM'88, IFAC International Symposium Series*, Copenhagen, Denmark, 1988

[6] D. J. Wilkinson, A. J. Morris, and M. T. Tham, "Constrained multivariable predictive control(a comparison with QDMC)," *Proc. of the American Control Conference, San Diego, California, U.S.A.*, 1620-1625, 1990.
 [7] B. Friedland, "Treatment of bias in recursive filtering," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, AC-14, 359-367, 1969.
 [8] B. Freidland, "Notes on separate-bias estimation," *IEEE Trans. on Automatic Control*, AC-23, 735-738, 1978.
 [9] K. J. Astrom and R. B. Bell, "Dynamic models for boiler turbine-alternator units:data logs and parameter estimation for a 160MW unit," "Report TFRT- 3192, Lund Institute of Technology, Sweden, 1987[10] B. Freidland," "Multidimensional maximum likelihood failure detection and estimation," *IEEE Trans. Auto. Contr.*, AC-26, 567-570, 1981.
 [10] G. E. Garcia and A. M. Moreshedi, "Quadratic programming solution of Dynamic Matrix Control (QDMC)," *Chemical Engineering communication*, 46, 73-87, 1986.
 [11] V. C. Klema and A. J. Laub, "The singular value decomposition: its computation and some applications," *IEEE Trans. Auto. Contr.*, 25, 164-176, 1980.



윤 석 민

1997년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 동대 학원 석사(1999). 1999.11월 ~ 현재 서울대학교 제어계측 신기술 연구센터 근무 관심분야는 제어이론 응용, 이상검출, 이상허용제어, 적응제어 등.



이 명 의

1985년 인하대 공대전기공학과 졸업. 동대학원 석사(1987). 동대학원 박사(1991) 1986년 12월~1995년 8월 현대 전자 산업전자 연구소. 1995년 9월~현재 한국기술교육대학교 정보통신과 조교수. 관심분야는 디지털 제어 및 컴퓨터 응용, 위성체 자세제어 시스템, 시스템 프로그래밍 등.



김 대 우

1988년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 동대학원 석사(1990) 1990년~1995년 LG산전 연구소 근무. 1995년~1996년 국립공업기술원. 현재 인하대 대학원 전기공학과 박사과정 재학중 관심분야 이상검출, 이상허용제어, 마이크로프로세서 응용, 디지털 시스템 등.

권 오 규

제어·자동화·시스템공학 논문지 제3권, 제6호, 참조.