

제약조건을 갖는 다변수 모델 예측제어기의 보일러 시스템 적용

Multivariable Constrained Model-Based Predictive Control with Application to Boiler Systems

손원기, 권오규

(Won-Kee Son and Oh-Kyu Kwon)

Abstract : This paper deals with the control problem under nonlinear boiler systems with noise, and input constraints. MCMBPC(Multivariable Constrained Model-Based Predictive Controller) proposed by Wilkinson et al.[10,11] is used and nominal model is modified in this paper in order to applied to nonlinear boiler systems with feed-forward terms. The solution of the cost function optimization constrained on input and/or output variables is achieved using quadratic programming, via singular value decomposition(SVD). The controller designed is shown to satisfy the constraints and to have excellent tracking performance via simulation applied to nonlinear dynamic drum boiler turbine model for 160MW unit.

Keywords : MCMBPC, input constraints, quadratic programming

I. 서론

요즘과 같이 에너지의 소비가 급증하는 사회에서 에너지를 절약하는 것은 중요한 문제로 대두되고 있다. 이러한 문제의 해결 방법의 하나로 산업용 보일러를 최적의 상태로 운전하고 전력계통의 원활한 운전을 위한 자동제어 장치 기술 개발 및 효율적인 운전 등을 통해 불필요한 에너지의 낭비를 막을 수 있다. 그런데 보일러는 대표적인 비선형 공정으로서 여러 가지 변수와 상수들이 복잡하게 연관되어 있다. 보일러는 거의 모든 출력에 대한 연료공급의 강한 영향, 연결관내의 시간지연, 내구성, 침식, 연료 열량의 변화, 드럼내의 비최소 위상특성과 불안정한 동특성, 플랜트 동특성과 같은 주파수대의 잡음, 구동기의 크기 및 변화율에 대한 제약 조건 등으로 인한 비선형 포화특성 등과 같은 어려움이 있다. 그리고 사용자의 증기요구량으로 인한 예측하기 어려운 부하의 변화는 시스템 동작에 중요한 영향을 미친다. 더우기 보일러는 최적의 동작상태를 유지하기 위해 운전중에 동작점을 여러 번 변화시킨다. 그러므로 보일러를 제어하는데 있어, 명령추종능력과 시스템의 안정도 문제를 모두 고려해야 할 필요가 있다.

과거 10여년 동안, Clarke등[2][3][4]이 일반예측제어GPC(Generalized Predictive Control)기법을 제안한 이후 이 제어기는 많은 분야에서 응용이 이루어져 왔다. 대부분의 연속형 전달함수는 작은 샘플시간으로 이산화시킬 때, 이산시간 불안정 영점이 생기는 경향이 있다. 즉, 비최소 위상 플랜트의 경우와 불안정 개루프 플랜트 특성을 지니는 시스템에 대해서 이 기법을 효과적으로 적용할 수 있다. 또한 시간지연의 처리가 쉬워서 시간지연 시스템의 제어에 효과적이며 특히, 다변수시스템에서 기존의 PID제어기보다 조정계수가 훨씬 적어 조정이 용이할 뿐만 아니라 입출력 결합 정도에 관계없이 적용이 가능하다. 그리고, 제약조건 및 포화특성이 있는 시스템에도 확장할 수 있는 장점을 갖고 있다. 실제적으로 모든 플랜트에는 구동기의 물리적 또는 동적 제

한성과 비선형성 등으로 인해 입출력에 대해서 제한적인 요소가 존재하게 된다. 이러한 제약조건들을 만족시키기 위해 단순히 제어신호만을 제한한다면 페루프 시스템이 불안정해질 수도 있다. 따라서 시스템의 안정성을 유지하면서 제약조건들을 만족시키기 위해서는 입력의 성능지표에 플랜트의 모든 제약조건들을 고려할 필요가 있다. 위와 같은 제약조건을 고려한 예측제어기법으로서 Wilkinson 등[10][11]이 제안한 알고리즘이 있는데, 이 방법은 특이치 분해법을 이용한 것으로 수치적으로 안정적인 뿐 아니라 제어성능의 강인성을 동시에 유지할 수 있는 것으로 알려져 있다.

그러나 지금까지 제시된 기본 예측제어기법들은 플랜트 입출력 전달함수에 적어도 한 스텝의 시간지연이 있는 경우나 상태공간 모델의 출력방정식에 입력항이 없는 경우에만 적용되는 제약성을 지니고 있다. 그런데 보일러 비선형 모델을 동작점에서 선형화시켜 상태방정식을 구하면 출력방정식에 입력항이 항상 나타나게 되어 예측제어기법을 적용하기가 매우 어렵게 된다. 따라서 이 논문에서는 이러한 문제점을 해소하기 위해 모델을 적절히 변형하는 방법을 제시하고, 제약조건을 갖는 다변수 예측제어기법을 산업용 보일러에 적용하는 방법을 제시한다. 먼저, 다변수 예측제어 알고리즘을 정리하고, 이 기법을 산업용 보일러에 적용하는 모의실험을 수행한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 앞먹임(Feed-forward)항을 개선시킨 공정 모델과 다변수 모델 예측제어기에 대한 개략적인 알고리즘과 제약조건을 갖는 다변수 모델 예측제어기에 대해 설명하고, III장에서는 보일러 적용 모의실험을 수행하여 성능지표에 제약조건을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우 그리고 제어입력을 단순히 상하 절단한 경우를 비교하면서 제안된 제어기의 성능을 검증하며, IV장에서 결론을 맺는다.

II. 다변수 모델 예측 제어기

II장에서는 본 논문에서 사용할 모델 예측제어기를 보일러에 적용하기 위해 대상시스템 표현을 변형하는 방법을 제시하고, 다변수 모델 예측제어기 알고리즘을 정리하기로 한다.

1. 공정 모델

공정 모델의 이산시간 상태공간 표현이 다음과 같다고 가정한다

$$\begin{aligned} \bar{x}(k+1) &= \bar{A}\bar{x}(k) + \bar{B}u(k) + \bar{G}w(k) \\ y(k) &= \bar{C}\bar{x}(k) + \bar{D}u(k) + \bar{R}v(k) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, u 와 y 는 공정입력 및 출력벡터, x 는 시스템의 상태 벡터, v 와 w 는 정규 백색 측정잡음과 외란을 나타낸다. 외란은 확정적 또는 불확정적 성질을 가질 수 있다.

$\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}, \bar{D}$ 그리고 \bar{G}, \bar{R} 는 모델의 계수행렬이다. 위의 (1)에서 출력방정식에는 앞먹임 항인 \bar{D} 가 존재하는데 예측제어 알고리즘을 써서 제어를 구성할 때에는 이 항이 있으면 제어를 설계하기가 곤란하다는 제약성이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 입력 u 대신에 Δu 를 사용하고 아래 그림 1과 같이 시스템의 전단에 적분기를 첨가한 형태로 적절히 변형시켜서 대상 시스템을 표현하기로 한다.

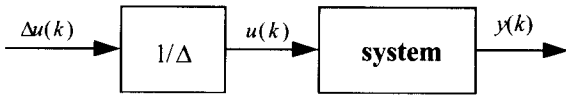


그림 1. 확장 시스템.
Fig. 1. Augmented system.

위 그림 1을 상태공간식으로 나타내면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \bar{x}(k+1) \\ u(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \bar{A} & \bar{B} \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}(k) \\ u(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \Delta u(k) \\ y(k) &= [\bar{C} \quad \bar{D}] \begin{bmatrix} \bar{x}(k) \\ u(k) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, 차분 연산자 Δ 는 $q-1$ 로 정의되며 q 는 순이동 연산자(Forward shift operator)를 나타낸다. (2)를 외란과 잡음이 존재하고, 다변수인 경우로 확장하면 다음과 같은 이산시간 상태공간 모델식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + B\Delta u(k) + Gw(k) \\ y(k) &= Cx(k) + Rv(k) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,

$$x(k) = \begin{bmatrix} \bar{x}(k) \\ u(k) \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} \bar{A} & \bar{B} \\ 0 & I \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix},$$

$$C = [\bar{C} \quad \bar{D}], \quad G = \begin{bmatrix} \bar{G} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad R = \bar{R}$$

(3)의 변형된 시스템 표현식에서는 u 대신에 Δu 를 사용하게 되므로 출력방정식에 입력항 Δu 가 나타나지 않음을 알 수 있다. 따라서 예측제어를 적용할 수 있는 형태가 된다.

2. 다변수 모델 예측 제어[12]

본 논문에서 모델 예측제어기는 제한된 예측구간내에서 미래 출력을 예측하기 위해서 앞먹임 항이 개선된 이산시간 상태공간 모델식(3)을 이용하여 유도된다. 여기서, 예측구간의 길이는 플랜트의 동력학 및 하드웨어 실현시 계산량에 의해서 선정된다. 예측된 출력은 주어진 기준입력에 대해 최적 제어신호를 찾기 위한 온라인(Online) 최적화 절차에서 사용된다. 불확정적인 잡음 v 와 외란 w 가 포함되어 있는 j 단 출력신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y(k+j) &= CA^j x(k) + \sum_{i=0}^{j-1} CA^{(j-i-1)} B \Delta u(k+i) \\ &\quad + \sum_{i=0}^{j-1} CA^{(j-i-1)} G w(k+i) + R v(k+j) \end{aligned} \quad (4)$$

j 단 예측자(j -step ahead predictor)는 (4)에 대해 기대값을 취함으로써 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{y}(k+j) &= E(y(k+j)) \\ &= CA^j E(x(k)) + \sum_{i=0}^{j-1} CA^{(j-i-1)} B \Delta u(k+i) \\ &\quad + \sum_{i=0}^{j-1} CA^{(j-i-1)} G E(w(k+i)) + R E(v(k+j)) \end{aligned} \quad (5)$$

그리고, 정규분포 밀도함수로부터 $E(v)=0$ 와 $E(w)=0$ 임을 이용하고, x 의 기대값 대신에 \hat{x} 을 대입하면 (5)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{y}(k+j) = CA^j \hat{x}(k) + \sum_{i=0}^{j-1} CA^{(j-i-1)} B \Delta u(k+i) \quad (6)$$

위의 (6)에서 상태 추정벡터는 잘 알려져 있는 정상 칼만필터[12]로 부터 구한다.

$$\begin{aligned} \bar{x}(k) &= A\hat{x}(k-1) + B\Delta u(k-1) \\ \hat{x}(k) &= \bar{x}(k) + L[y(k) - C\bar{x}(k)] \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, 칼만필터는 시스템의 실제 상태벡터와 상태 추정벡터간의 오차 분산값을 최소화(Minimization)함으로써 설계된다. 칼만필터 이득 L 을 계산하기 위해서는 시스템 행렬 A, B, C 및 잡음과 외란에 대한 분산값 등에 관한 정보는 미리 알고 있어야 한다.

모델 예측제어기 문제는 외란과 잡음이 존재하는 시스템에 대해 다음과 같은 성능지표(Cost function)를 최소화하는 제어입력을 찾는 문제이다.

$$J = \sum_{j=N_1}^{N_2} [r(k+j) - \hat{y}(k+j)]^2 + \lambda \sum_{j=0}^{N_u-1} [\Delta u(k+j)]^2 \quad (8)$$

여기서, N_1, N_2 는 예측구간, N_u 는 제어구간, λ 는 제어증분에 대한 가중치, r 는 기준입력으로 정의한다. 예측제어기의 성능은 미래 출력들의 범위로 정의되는 예측구간과 원하는 제어목적을 성취하기 위한 미래 제어신호의 자유도수를 명시하는 제어구간에 달려있다. 따라서, 주요 동조계수들 예측구간, 제어구간, 제어 가중치 등을 잘 동조시키는 것은 예측제어에 있어서 중요한 문제이다. 성능지표(8)에서 첫번째 항은 미래 기준입력에 대한 미래 추종오차의 제곱항, 두번째 항은 제어증분에 대한 가중(Weighting)제곱항을 나타낸다. $j \geq N_u$ 에 대해 모든 제어증분 $\Delta u(k+1)$ 은 0이다. 즉, 단지 제어증분은 제어구간 내에서만 최적화됨을 알 수 있다. (8)의 성능지표는 벡터형식으로 다시 표현할 수 있다.

$$J = (r - \hat{y})(r - \hat{y}) + \lambda \Delta u^T \Delta u \quad (9)$$

$$r = [r(k+N_1) \quad \dots \quad r(k+N_2)]^T$$

$$\hat{y} = [\hat{y}(k+N_1) \quad \dots \quad \hat{y}(k+N_2)]^T$$

$$\Delta u = [\Delta u(k) \quad \dots \quad \Delta u(k+N_u-1)]^T \quad (10)$$

출력 예측벡터는 다음과 같은 행렬들로부터 계산될 수 있다.

$$\hat{y} = F\hat{x}(k) + H\Delta u \quad (11)$$

$$F = \begin{bmatrix} CA^{N_1} \\ \mathbf{M} \\ CA^{N_2} \end{bmatrix}; \quad H = \begin{bmatrix} h_{N_1,1} & \Lambda & h_{N_1,N_u} \\ \mathbf{M} & \mathbf{O} & \mathbf{M} \\ h_{N_2,1} & \Lambda & h_{N_2,N_u} \end{bmatrix}, \quad h_{j,i} = \begin{cases} CA^{j-i} B & j \geq i \\ 0 & j < i \end{cases} \quad (12)$$

(11)에서 제어입력이 변화하지 않고 일정한 값을 갖는 경우 즉, 제어증분(Control increment)이 0일 때의 예측 출력벡터는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f = F\hat{x}(k) \quad (13)$$

(11)과 (13)을 (9)에 대입하면 다음과 같은 2차형 최소화 문제를 만들 수 있다.

$$J(\Delta u) = \Delta u^T [H^T H + \lambda I] \Delta u - 2(r - f)^T H \Delta u + (r - f)^T (r - f) \quad (14)$$

수위를 예측 하기 위해 제안한 160[MW]급 비선형 보일러 터빈모형을 사용한다. 비선형 보일러 터빈모형은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= -0.0018u_1x_1^{9/8} + 0.9u_1 - 0.15u_3 \\
 \dot{x}_2 &= [(0.73u_2 - 0.16)x_1^{9/8} - x_2]/10 \\
 \dot{x}_3 &= [14lu_3 - (1.1u_2 - 0.19)x_1] / 85 \\
 \dot{x}_4 &= (acs - x_4)/10 \\
 \dot{x}_5 &= [1000(acs - x_4) - x_5]/10 \\
 \dot{x}_6 &= (u_3 - x_6)/20 \\
 \dot{x}_7 &= [3.55(1.1u_2 - 0.19)x_1 - x_7] / 20 \\
 acs &= (1 - 0.001538x_3)(0.8x_1 - 25.6) / [x_3(1.0394 - 0.0012304x_1)] \\
 qe &= (0.85u_2 - 0.147)x_1 + 45.59u_1 - 2.514u_3 - 2.096 \\
 y_1 &= x_1 \\
 y_2 &= x_2 \\
 y_3 &= 0.05(0.13073x_3 + 100acs + qe/9 - 67.975) \quad (27)
 \end{aligned}$$

여기서, x_1, x_2, x_3 는 각각 드럼 증기압력[kg/cm²], 전기적 출력[MW], 그리고 드럼내의 유체의 밀도[kg/cm³]를 나타내며, 마지막 4개의 상태변수는 연료의 흐름에 있어서 변화에 대한 드럼 수위의 Shrink/Swell을 예측하기 위한 보조상태들이다. y_3 는 드럼수위[m], acs 는 증기의 질(Quality), qe 는 증발률(Evaporation rate)을 각각 나타낸다. u_1, u_2, u_3 는 각각 보일러 연료 공급량 제어 밸브위치(0-1 corresponds to 0-14 kg/s), 터빈으로의 증기의 양 제어 밸브위치, 급수량 제어 밸브위치(0-1 corresponds to 0-140 kg/s)를 나타내고 이 값들은 모두 정규화된 값들이다. 그림 3은 산업용 보일러 플랜트의 입력과 출력들을 보여 준다.

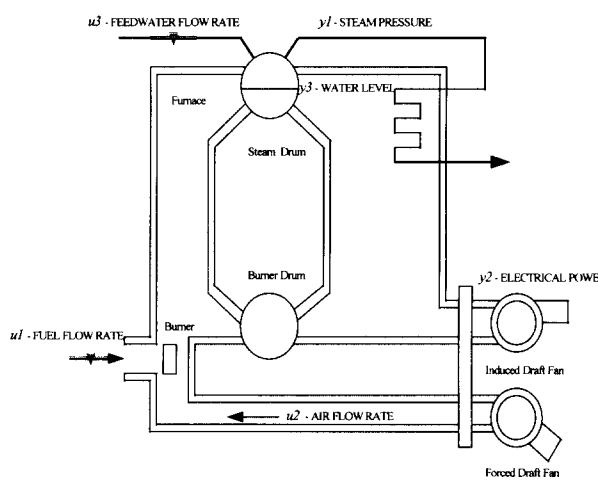


그림 3. 산업용 증기발생 플랜트.
Fig. 3. Industrial steam generation plant.

그리고 다음과 같은 구동기의 크기 및 변화율(Amplitude and Rate)에 대한 제약조건을 갖고 있다.

$$\begin{aligned}
 -0.007/\text{sec} \leq \Delta u_1 \leq 0.007/\text{sec} \quad 0 < u_1 < 1 \\
 -2/\text{sec} \leq \Delta u_2 \leq 0.02/\text{sec} \quad 0 < u_2 < 1 \\
 -0.05/\text{sec} \leq \Delta u_3 \leq 0.05/\text{sec} \quad 0 < u_3 < 1 \quad (28)
 \end{aligned}$$

그림 4는 이러한 구동기의 제약조건을 블럭도로 표현한 것이다. (27)의 비선형 모델은 $\dot{x} = f(x, u)$ 와 $y = g(x, u)$ 로 표현할 수 있다. 여기에서 설계하려는 제어기는 비선형 모델로부터 직접 구할 수 없기 때문에 특정 동작점에서 공정을 선형화 시킨다. 이로부터 구해진 보일러의 선형화 모델은 다음과 같은 상태 방정식으로 표시할 수 있다.

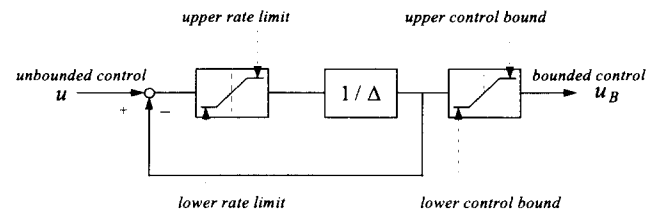


그림 4. 구동기 동특성.
Fig. 4. Actuator dynamics.

$$\begin{aligned}
 \delta \dot{x} &= A_c \delta x + B_c \delta u \\
 \delta y &= C_c \delta x + D_c \delta u \quad (29)
 \end{aligned}$$

여기서,

$$\begin{aligned}
 A_c &= \frac{\partial f}{\partial x}(x^0, u^0), \quad B_c = \frac{\partial f}{\partial u}(x^0, u^0) \\
 C_c &= \frac{\partial g}{\partial x}(x^0, u^0), \quad D_c = \frac{\partial g}{\partial u}(x^0, u^0) \quad (30)
 \end{aligned}$$

이며, x^0, u^0, y^0 는 동작점에서의 상태벡터, 입력벡터, 출력벡터이고, $\delta x = x - x^0, \delta u = u - u^0, \delta y = y - y^0$ 이다. 또한, 본 논문에서 사용한 공칭 동작점은 $x^0 = [118.8 \ 85.063 \ 470.8]^T, u^0 = [0.4182 \ 0.7590 \ 0.5434]^T, y^0 = [118.8 \ 85.063 \ 0.322]^T$ 이고, 이 값들로부터 얻어진 연속형 상태공간 모델을 다시 1초[sec]로 이산화한 이산형 상태공간 모델식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 A &= \begin{bmatrix} 0.9972 & 0 & 0 \\ 0.0765 & 0.9048 & 0 \\ -0.0076 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0.8987 & -0.3880 & -0.1498 \\ 0.0350 & 14.9803 & -0.0058 \\ -0.0034 & -1.5359 & 1.6594 \end{bmatrix} \\
 C &= \begin{bmatrix} 1.0000 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0000 & 0 \\ 0.0057 & 0 & 0.0048 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.2533 & 0.5610 & -0.0140 \end{bmatrix} \quad (31)
 \end{aligned}$$

모의실험 결과는 그림 5-7과 같다. 잡음에 대한 영향을 보기 위해 각각의 출력들에 대해서 분산값이 각각 0.9, 0.9, 0.01을 갖는 백색잡음을 첨가하였다. 이 그림들은 (31)의 선형화 모델에 (28)과 같은 제약조건이 있을 때 제어기를 설계하여 비선형 보일러 모델에 적용한 비선형 모의실험 결과들이다. 각 그림의 (a)부터 (c)는 비선형 보일러의 출력들, (d)부터 (f)는 제어입력들, (g)부터 (i)까지는 제어증분을 각각 나타낸 것이다. 제약조건을 갖는 모델 예측제어기의 성능을 검증하기 위해서 다음과 같은 세 가지의 경우에 대해서 모의실험을 수행하였다.

- 1) 제약조건이 없는 경우 - 보일러의 출력과 입력의 특성을 파악하기 위해서 구동기측 제약조건이 없는 경우를 생각하여 입출력 응답의 변화를 살펴보았다. 그림 5에서 보는 바와 같이 세 가지 출력 모두에서 심한 오버슈트(Over shoot)가 생김을 알 수 있고, 특히 세번째 출력인 수위가 크게 출렁이는 것을 볼 수 있다. 또한, 세번째 제어입력 뿐만 아니라 제어증분들이 모두 크게 요구되고 있음을 알 수 있다.
- 2) 제어신호를 단순 상하절단(Clipping)한 경우 - 제약조건을 고려하지 않은 제어기에서 나온 제어신호를 보일러가 가지고 있는 제약조건에 제한값에서 단순히 상하절단 한 경우이다. 그림 6에서 보는 바와 같이 전기적 출력은 어느 정도 기준입력을 추종하고 있지만 드럼압력과 드럼수위의 성능이 크게 떨어지고 있음을 알 수 있다. 제어 입력신호와 제어증분은 크기 및 변화율의 제한값을 만족하고 있지만

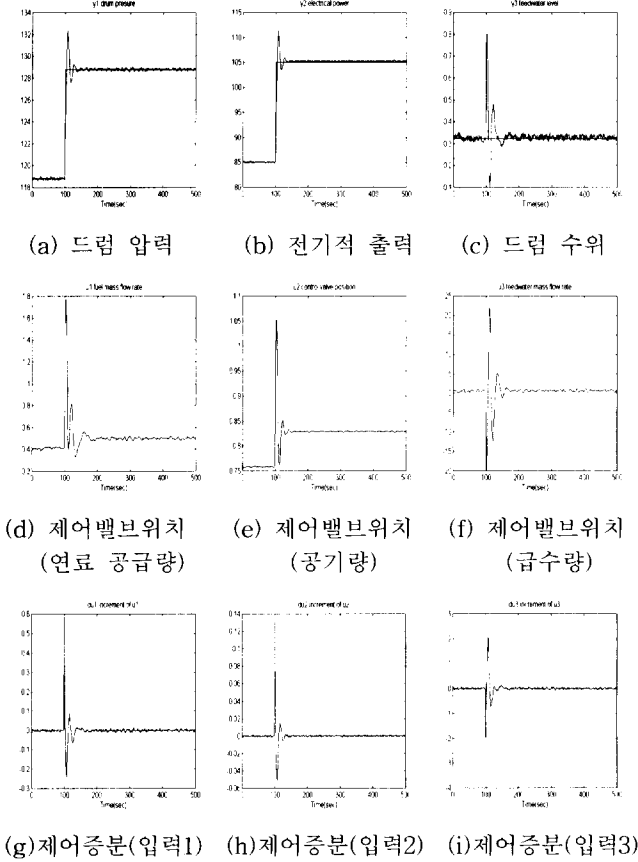


그림 5. 제약조건을 고려하지 않은 경우.
Fig. 5. Unconstrained MBPC.

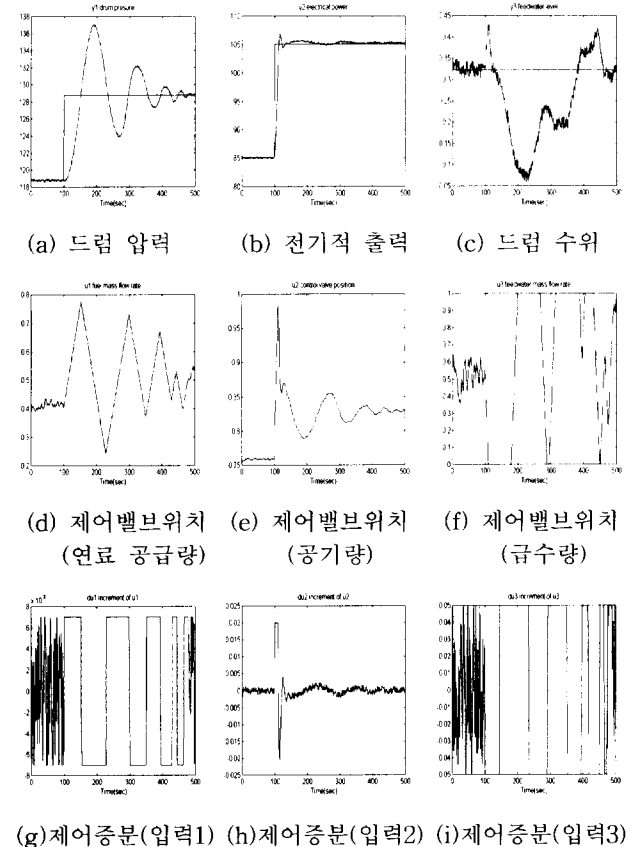


그림 6. 제어입력을 단순히 상하 절단한 경우.
Fig. 6. Clipping case.

크게 진동(Oscillation)을 일으키고 있다. 따라서 제약조건을 고려하지 않고 단순히 제어신호를 상하절단한 경우에는 시스템을 불안정하게 하고 성능을 크게 저하시킴을 알 수 있다.

3) 제약조건을 고려한 경우 - 보일러의 구동기 제약조건을 성능지표내에 고려해서 제어입력을 최적화시킨 경우로서, 그림 7에서 보는 바와 같이 앞서 실험한 경우 보다 안정도가 향상되고 명령추종 성능이 우수함을 볼 수 있다.

이상의 모의실험 결과에서 보여주듯이, 구동기 입력측에 제약조건을 갖는 비선형 보일러 터빈에 대해 여기서 설계한 다변수 모델 예측제어기를 적용할 경우, 이 제어기가 보일러의 기본적인 요구사항 및 구동기의 크기 및 변화율의 제약조건을 잘 만족하면서 또한 좋은 성능을 가짐을 확인하였다.

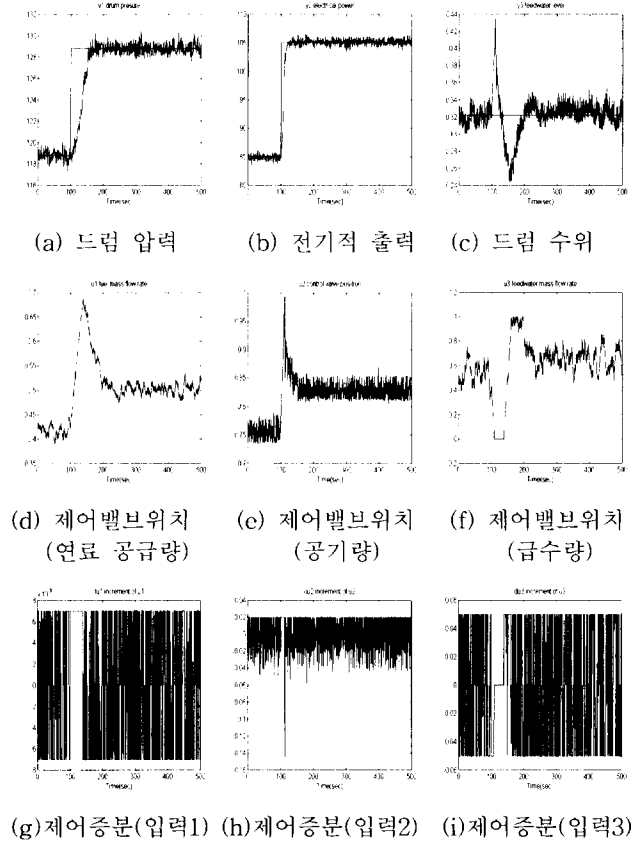


그림 7. 제시한 제어를 적용한 경우.
Fig. 7. MCMBPC.

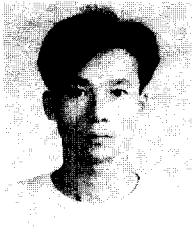
IV. 결론

본 논문에서는 제약조건을 갖는 다변수 모델 예측제어기를 비선형 보일러에 적용하는 문제를 다루었다. 예측제어기의 표준형 알고리즘은 보일러 제어에 직접 적용할 수 없기 때문에 먼저 적용 가능한 형태로 대상 시스템을 표현하는 방법을 제시하였다. 다음에 MCMBPC 알고리즘을 정리하고, 이것을 입력에 대해 제약조건을 갖는 산업용 보일러 모델에 적용하는 모의실험을 수행하여 설계된 제어기의 성능이 만족할 만함을 예시하였다. 차후 과제로 보일러 터빈 시스템에 어떠한 이상(Fault)이 발생하였을 경우 이러한 이상에 대해서 견실할 뿐만 아니라 안정도 문제도 해결할 수 있는 이상 허용제어(Fault Tolerant Control)가 남아 있다.

참고문헌

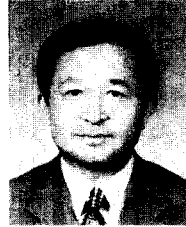
[1] K. J. Åström and R. B. Bell, "Dynamic models for boiler turbine-alternator units: data logs and para-

- meter estimation for a 160MW unit," *Report TFRT-3192*, Lund Institute of Technology, Sweden, 1987.
- [2] D. W. Clarke and C. Mohatadi and P. S. Tuffs, "Generalized predictive control-Parts 1 and 2," *Automatica*, vol. 23, pp. 137 - 160, 1987.
- [3] D. W. Clarke and C. Mohatadi and P. S. Tuffs, "Properties of generalized predictive control," *Automatica*, vol. 25, pp. 859-875, 1989.
- [4] D. W. Clarke and C. Mohatadi and P. S. Tuffs, "Constrained receding-horizon predictive control," *Proc. of IEE*, Pt. D, 138, pp. 347-354, 1991.
- [5] G. E. Garcia and A. M. Moreshedi, "Quadratic programming solution of dynamic matrix control (QDMC)," *Chemical Engineering Communication*, vol. 46, pp. 73-87, 1986.
- [6] V. C. Klema and A. J. Laub, "The singular value decomposition: its computation and some applications," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 25, pp. 164-176, 1980.
- [7] W. C. Li and L. T. Biegler, "Process control strategies for constrained nonlinear systems," *Industrial and Engineering Chemical Research*, vol. 27, pp. 1421-1433, 1988.
- [8] M. T. Tham, "Some aspects of multivariable self-tuning control," PhD. Thesis, Univ. of Newcastle upon Tyne, UK, 1985.
- [9] T. T. C. Tsang and D. W. Clarke, "Generalized predictive control with input constraints," *Proc. IEE*, PtD, vol. 135, pp. 451-460, 1988
- [10] 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, pp. 1620-1625, 1990.
- [11] D. J. Wilkinson, A. J. Morris and M. T. Tham, "Multivariable constrained predictive control(with application to high performance distillation)," *International Journal of Control*, vol. 59, no. 3, pp. 841-862, 1994.
- [12] David Clarke, "Advances in model based predictive control," Oxford University Press, 1994.



손 원 기

1995년 인하대 전기공학과 졸업. 동대학원 석사(1997). 1997-현재 인하대학교 전자·전기·컴퓨터공학부 박사과정. 관심분야는 적응제어, 제어 및 응용, 이상검출 및 진단, 고장 허용제어.



권 오 규

1978년 서울대 전기공학과 졸업. 동대학원 석사(1980), 동대학 박사(1985). 1982-현재 인하대학교 전자·전기·컴퓨터공학부 교수. 관심분야는 제어계측 이론 및 응용, 다변수 건실제어, 고장허용제어, 이상검출 및 진단.