Proceedings of the 11th
KACC, October 1996

제약조건을 갖는 다변수 모델 예측 제어기의 비선형 보일러 시스템에 대한 적용

Constrained Mutivariable Model Based Predictive Control application to nonlinear boiler system

ㅇ 손 원 기*, 이 명 의**, 권 오 규*

*인하대학교 전기공학과 (Tel: 032-860-7395; Fax: 032-860-5822; E-mail: okkwon95@dragon.inha.ac.kr)
**한국기술교육대학교 정보통신공학과 (Tel: 0417-60-1186; Fax: 0417-64-3261; E-mail: melee@kitenms.kite.ac.kr)

Abstracts This paper deals with MCMBPC(Multivariable Constrained Model Based Predictive Controller) for nonlinear boiler system with noise and disturbance. MCMBPC is designed by linear state space model obtained from some operating point of nonlinear boiler system and Kalman filter is used to estimate the state with noise and disturbance. The solution of optimization of the cost function constrained on input and/or output variables is achieved using quadratic programming, viz. singular value decomposition (SVD). The controller designed is shown to have excellent tracking performance via simulation applied to nonlinear dynamic drum boiler turbine model for 160MW unit.

1. 서 론

요즘과 같이 에너지의 소비가 급증하는 사회에서 에너지를 절약하는 것은 중요한 문제로 대두되고 있다. 이러한 문제의 해결 방법의 하나로 보일러를 최적의 상태로 운전하는 자동제어 장치 기술 개발 및 효율적인 운전 등을 통해 불필요한 에너지의 낭비를 막을 수 있다. 그런데 보일러는 대표적인 비선형 공정으로서 모델 불확실성, 외란, 시간지연 및 입력의 제약조건등을 지니고 있어서 제어하기 어려운 대상으로 알려져 있다.

과거 10 여년 동안, Clarke 등[2,3,4]이 GPC(Generalized Predictive Control) 기법을 제안한 이후 이 제어기는 많은 분야에서 응용이 이루어져 왔다. 이 기법은 시간지연의 처리가 쉬워서 시간 지연 시스템의 제어에 효과적이며 제약조건이 있는 시스템에도 확장할 수 있는 장점을 갖고 있다. 실제적으로 모든 플랜트에는 구동기의 물리적 또는 동적 제한성과 비선형성 등으로 인해 입출력에 대해서 제한적인 요소가 존재하게 된다. 이러한 제약조건들을 만족시키기 위해 단순히 제어 입력만을 제한한다면 폐루프 시스템이 불안정해질 수도 있다. 따라서 시스템의 안정성을 유지하면서 제약조건들을 만족시키기 위해서는 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 안정적일 뿐 아니라 제어성능의 강인성을 동시에 유지할 수 있는 것으로 알려져 있다.

이 논문에서는 제약조건을 갖는 다변수예측제어기법을 산업용 보일러에 적용하는 문제를 다룬다. 먼저, 다변수 예측제어 알고리즘을 정리하고, 이 기법을 산업용 보일러에 적용하는 모의 실험을 수행한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 프로세스 모델과 상태추정에 칼만 필터를 이용한 다변수 모델예측제어기에 대해 개략적인 알고리즘[12]을 보여준다. 3 장에서는 제약조건을 갖는 다변수 모델예측제어기에 대해 설명하고, 4 장에서는 모의실험결과를 제시하며, 5 장에서는 결론을 기술한다.

2. 다변수 모델 예측 제어기

2.1 공정 모델

공정 모델의 이산시간 상태공간 표현이 아래와 같다고 한다.

$$\begin{aligned} \bar{x}(k+1) &= \bar{A}\bar{x}(k)+\bar{B}\bar{u}(k)+\bar{G}w(k) \\ y(k) &= \bar{C}\bar{x}(k)+\bar{D}\bar{u}(k)+\bar{R}v(k) \end{aligned} \tag{2.1}$$

여기서, $\bar{u}$ 와 y 는 공정 측정 벡터, x 는 시스템의 상태벡터, v 와 w 는 정규 백색 측정 잡음과 외란 을 나타낸다. 외란은 확정적 또는 불확정적 성질을 가질 수 있다. 행렬 $\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}, \bar{D}$ 그리고 $\bar{G}, \bar{R}$ 는 모델의 계수이다.

위의 식(2.1)에서는 앞먹임 항인 $\bar{D}$ 가 존재하지만, 실제로 예측 제어기를 구성할 때에는 이 항을 고려하여 설계할 수가 없기 때문에 이러한 문제점을 해결하기 위해서 아래 그림 1 과 같이 시스템의 전단에 적분기와 같은 차분 연산자를 첨가한 형태로 적절히 변형시켜서 제어기를 구성해야 한다.

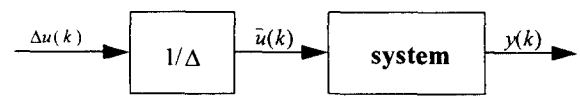


그림 1. 확장 시스템
Fig 1. Augmented system

위 그림 1 을 상태 공간식으로 나타내면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \bar{x}(k+1) \\ \bar{u}(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \bar{A} & \bar{B} \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}(k) \\ \bar{u}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \Delta u(k) \\ y(k) &= \begin{bmatrix} \bar{C} & \bar{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}(k) \\ \bar{u}(k) \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{2.2}$$

여기서, 차분 연산자 Δ 는 $1-q^{-1}$ 로 정의 되며, 또한 q^{-1} 는 이산시간에 있어서 역이동연산자(*Backward shift operator*)를 나타낸다. 식(2.2)를 외란과 잡음이 존재하고, 다변인 경우로 확장하면 다음과 같은 상태 공간 모델식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k)+B\Delta u(k)+Gw(k) \\ y(k) &= Cx(k)+Rv(k) \end{aligned} \tag{2.3}$$

여기서,

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

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

2.2 다변수 모델 예측 제어 (MMBPC: Multivariable Model Based Predictive Control)

본 논문에서, 모델예측제어기는 앞먹임항이 개선된 상태공간 모델식(2.3)으로 부터 유도된다.
불확정적인 잡음 v 와 외란 w 가 포함되어 있는 j 번째 출력 신호는 다음과 같다.

$$y(k+j)=CA^{j}x(k)+\sum_{i=0}^{j-1}CA^{(j-i-1)}B\Delta u(k+i) +\sum_{i=0}^{j-1}CA^{(j-i-1)}Gw(k+i)+Rv(k+j) \tag{2.4}$$

j 번째 예측자는 식(2.4)에 대해 기대값을 취함으로써 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}\hat{y}(k+j)&=\mathrm{E}\big(y(k+j)\big)\\&=CA^{j}\mathrm{E}\big(x(k)\big)+\sum_{i=0}^{j-1}CA^{(j-i-1)}B\Delta u(k+i)\\&\quad+\sum_{i=0}^{j-1}CA^{(j-i-1)}G\mathrm{E}\big(w(k+i)\big)+R\mathrm{E}\big(v(k+j)\big)\end{aligned} \tag{2.5}$$

그리고, $\mathrm{E}(v)=0$ 와 $\mathrm{E}(w)=0$ 임을 이용하고, x 의 기대값 대신에 $\hat{x}$ 을 대입하면 식(2.5)는 다음과 같이 나타 낼 수 있다.

$$\hat{y}(k+j)=CA^{j}\hat{x}(k)+\sum_{i=0}^{j-1}CA^{(j-i-1)}B\Delta u(k+i) \tag{2.6}$$

위 식(2.6)에서 상태 추정 벡터 $\hat{x}$ 는 이미 잘 알려진 칼만 필터로부터 구한다.

$$\begin{aligned}\bar{x}(k)&=A\hat{x}(k-1)+B\Delta u(k-1)\\\hat{x}(k)&=\bar{x}(k)+L[y(k)-C\bar{x}(k)]\end{aligned} \tag{2.7}$$

여기서, 칼만 필터는 시스템의 실제 상태 벡터와 상태 추정 벡터간의 오차 분산 값을 최소화(Minimization) 함으로써 설계된다.

$$e(k)=\hat{x}(k)-x(k) \tag{2.8}$$

칼만 필터 이득 L 은 다음과 같은 이산 리카티 방정식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}P(k+1)&=[A-N(k)C]P(k)[A-N(k)C]^{T}\\&\quad+G\sigma_{w}G^{T}+N(k)\sigma_{v}N^{T}(k)\\&\quad-G\sigma_{wv}N^{T}(k)-N(k)\sigma_{wv}G^{T},\\L&=[P(\infty)C^{T}+A^{T}G\sigma_{wv}][CP(\infty)C^{T}+\sigma_{v}]^{-1}\end{aligned} \tag{2.9}$$

여기서,

$$N(k)=[AP(k)C^{T}+G\sigma_{wv}][CP(k)C^{T}+\sigma_{v}]^{-1} \tag{2.10}$$

이고, $\sigma_{w}, \sigma_{wv}, \sigma_{v}$ 는 외란 및 잡음의 분산값을 나타낸다.

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

$$J=\sum_{j=N1}^{N2}[r(k+j)-y(k+j)]^{2}+\lambda\sum_{j=0}^{Nu-1}[\Delta u(k+j)]^{2} \tag{2.11}$$

여기서, N1, N2 는 예측구간, Nu 는 제어구간, λ 는 제어 증분에 대한 가중치, r 는 기준입력으로 정의한다. 성능지표의 첫 번째 항은 미래 기준 입력에 대한 미래 추종 오차의 제곱항, 두 번째 항은 제어 증분에 대한 가중(Weighting) 제곱항을 나타낸다. $j \geq Nu$ 에 대해 모든 제어 증분 $\Delta u(k+j)$ 는 0 이다. 즉, 단지 제어 증분은 제어 구간 내에서만 최적화됨을 알 수 있다. 식(2.11)의 성능 지표는 벡터 형식으로 다시 표현할 수 있다.

$$J=(r-\hat{y})^{T}(r-\hat{y})+\lambda\Delta u^{T}\Delta u \tag{2.12}$$

$$\begin{aligned}r&=[r(k+N1)\ \cdots\ r(k+N2)]^{T}\\\hat{y}&=[\hat{y}(k+N1)\ \cdots\ \hat{y}(k+N2)]^{T}\\\Delta u&=[\Delta u(k)\ \cdots\ \Delta u(k+Nu-1)]^{T}\end{aligned} \tag{2.13}$$

출력 예측 벡터는 다음과 같은 행렬들로부터 계산될 수 있다.

$$\hat{y}=F\hat{x}(k)+H\Delta u(k) \tag{2.14}$$

$$F=\begin{bmatrix}CA^{N1}\\\vdots\\CA^{N2}\end{bmatrix};\quad H=\begin{bmatrix}h_{N1,1}&\cdots&h_{N1,Nu}\\\vdots&\ddots&\vdots\\h_{N2,1}&\cdots&h_{N2,Nu}\end{bmatrix},\quad h_{j,i}=\begin{cases}CA^{j-i}B & j\geq i\\0 & j<i\end{cases} \tag{2.15}$$

식(2.14)에서 제어입력이 변화하지 않고 일정한 값을 갖는 경우 즉, 제어 증분(Control increment)이 0 일 때의 예측 출력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f=F\hat{x}(k) \tag{2.16}$$

식(2.14)와 (2.16)을 식(2.12)에 대입하면 다음과 같은 이차형 최소화 문제를 만들 수 있다.

$$J(\Delta u)=\Delta u^{T}[H^{T}H+\lambda I]\Delta u-2(r-f)^{T}H\Delta u+(r-f)^{T}(r-f) \tag{2.17}$$

위식(2.17)과 같은 이차형 성능지표의 최소화 문제에서 최소 제곱법을 사용함으로써 제약조건이 없는 경우에는 해를 쉽게 풀 수 있다.

$$\Delta u=(H^{T}H+\lambda I)^{-1}H^{T}(r-f) \tag{2.18}$$

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

$$\begin{aligned}u(k)&=u(k-1)+K(r-f)\\K&=(I\ 0\ \cdots\ 0)(H^{T}H+\lambda I)^{-1}H^{T}\end{aligned} \tag{2.19}$$

칼만 필터를 이용한 다변수 비선형 시스템에 대한 제약조건을 갖지 않는 모델 예측 제어기의 블럭도는 그림 2 와 같이 표현 할 수 있다.

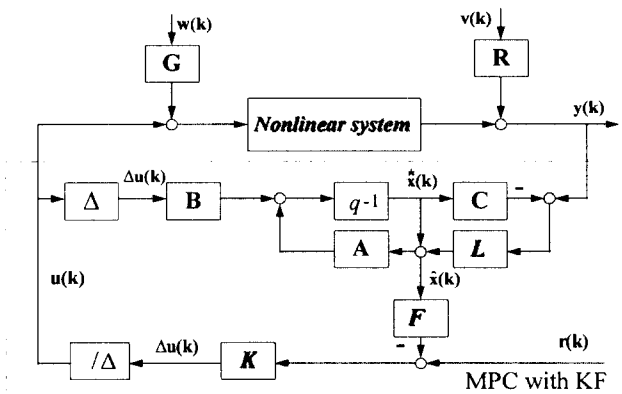


그림 2. 모델 예측 제어기의 블럭도.
Fig 2. Block diagram of MPC

3. 제약조건을 갖는 다변수 모델예측제어(CMPC: Constrained Multivariable Model Based Predictive Control)

대개의 공정들은 물리적인 제약 또는 입력의 포화, 동작 범위의 제한 등 여러 제약 조건들에 의해 영향을 받는다. 따라서, 공정 제어 알고리즘들은 이러한 제약 조건들을 모두 만족하면서 또한, 좋은 성능을 발휘할수 있도록 설계되어야 한다. 그렇지 못할 경우에는 폐루프 성능이 몹시 안 좋아지거나 심지어 시스템을 불안정하게 할 수도 있다. 그러므로 제어기 설계시에는 모든 공정 제약조건을 제어 성능 지표 내에 고려해서 구해 낼 필요가 있다.

제약조건을 갖는 경우에 식(2.17)의 최적화 문제는 다음과 같은 선형 부등식의 최소 제곱 법 문제를 푸는 것으로 나타낼 수 있다.

$$Min\ \|\Gamma x-\mathrm{b}\|,\qquad s.t.\ \ \Im x\geq \mathrm{h} \tag{3.1}$$

여기서,

$$\Gamma=\begin{bmatrix}H\\\lambda I^{1/2}\end{bmatrix},\quad \mathrm{b}=\begin{bmatrix}r-f\\0\end{bmatrix},\quad x=\Delta u \tag{3.2}$$

이고, $\Im$ 는 제약 조건들에 대한 동적 정보를, h 는 제약조건들에 대한 제한값들을 나타낸다.

제약 조건이 포함되어 있는 이차형 성능지표의 최소화 문제를 푸는

데 있어서 본 논문에서는 특이치 분해법(SVD)을 이용한다. 특이치 분해법은 행렬의 의사역행렬(Pseudoinverses)연산을 포함하는 문제를 해결 하는데 있어 가장 수치적으로 안정한 알고리듬중의 하나이다. 식(3.1)과 같이 선형 부등 조건을 갖는 최소자승 부등식 문제(LSI: Least Square with Inequality Constraints Problem)를 풀때, 특이치 분해를 사용하면 먼저 제약 조건을 갖지 않는 해가 결정된다. Γ 의 특이치 분해는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Gamma = U\Sigma V^T \tag{3.3}$$

여기서, U,V 는 직교(*Orthogonal*)행렬들이고, Σ 는 특이치들의 대각화 행렬이다. 식(3.3)의 특이치 분해를 이용하면 식(3.1)의 놈(Norm)최소화 문제의 결과는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} x &= (\Gamma^T\Gamma)^{-1}\Gamma^T \mathrm{b} \\ &= V\Sigma^{-1}U^T \mathrm{b} \end{aligned} \tag{3.4}$$

만약 위에서 구한 해가 주어진 제약조건을 만족하지 못하면, LSI 문제는 제약조건들을 만족하는 해를 구하는 최단거리 계획문제(LDP: Least Distance Progamming)문제로 변환시켜야 된다.

Γ 의 분할된 특이치 분해가 다음과 같다고 하자.

$$\begin{aligned} \Sigma &= \begin{bmatrix} S & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad S = diag(s_1, \ldots, s_r) \\ \Gamma &= U\begin{bmatrix} S & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}V^T = [U_1 \quad U_2]\begin{bmatrix} S \\ 0 \end{bmatrix}V^T \end{aligned} \tag{3.5}$$

변수 치환 즉, $x=Vy$ 에 의해 LSI 의 비용 함수는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi(x) &= \|\mathrm{b} - \Gamma x\|^2 = \left\| \begin{bmatrix} U_1{}^T\mathrm{b} \\ U_2{}^T\mathrm{b} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Sy \\ 0 \end{bmatrix} \right\|^2 \\ &= \|\bar{\mathrm{b}}_1 - Sy\|^2 + \|\bar{\mathrm{b}}_2\|^2 = \|z\|^2 + \|\bar{\mathrm{b}}_2\|^2 \end{aligned} \tag{3.6}$$

여기서, $\bar{\mathrm{b}}_1 = U_1{}^T\mathrm{b}$, $z = \bar{\mathrm{b}}_1 - Sy$ 를 나타낸다. 식(3.6)에서 $\|\bar{\mathrm{b}}_2\|^2$ 을 제외하면 LSI 문제는 다음의 LDP 문제와 같게 된다.

$$Min \|z\|, \qquad s.t. \quad \bar{\Im} z \geq \bar{\mathrm{h}} \tag{3.7}$$

여기서, $\bar{\Im} = \Im V S^{-1}$, $\bar{\mathrm{h}} = \mathrm{h} - \bar{\Im}\bar{\mathrm{b}}_1$ 을 나타낸다. LDP 문제를 풀기 위해서는 첫째로 NNLS(*Non-negative Least Squares*)문제를 먼저 해결 하여야 한다.

$$Min \|Q\mathrm{d} - \gamma\|, \qquad s.t. \ \mathrm{d} \geq 0 \tag{3.8}$$

여기서, $Q = \begin{bmatrix} \bar{\Im}^T \\ \bar{\mathrm{h}}^T \end{bmatrix}$, $\gamma = [0 \ \ldots \ 0 \ 1]^T$ 를 나타낸다. 두 번째로 다음과 같은 잔차(residual)벡터 α 를 이용하여 LDP 문제의 해 z_i 가 구해지게 된다.

$$\begin{aligned} &\alpha = Q\mathrm{d} - \gamma, \qquad \gamma \in R^{(n+1)\times 1} \\ &z_i = -\alpha_i / \alpha_{n+1}, \qquad i = 1, \ldots, n \end{aligned} \tag{3.9}$$

여기서, n 는 rank(S)을 의미한다. 마지막으로 식(3.9)을 이용하여 원래의 LSI 문제의 해를 다음과 같이 구해 낼 수 있다.

$$x = VS^{-1}(z + \bar{\mathrm{b}}_1) \tag{3.10}$$

결과적으로 말하자면, 제어 입력은 모든 제약조건이 만족될 경우에만 공정으로 보내지게 된다.

4. 모의 실험

본 논문에서는 3 장에서 기술한 제약조건을 갖는 다변수모델예측제어 알고리즘의 성능을 확인하기 위해 산업용 보일러시스템에 적용하는 모의실험을 수행한다. 보일러 모델로는 Åström 등[1]이 보일러의 드럼 압력, 전기적 출력, 드럼 수위를 예측 하기위해 제안한 160MW 급 비선형 보일러 터빈 모델을 사용한다. 비선형 보일러 터빈 모델은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -0.0018u_1x_1^{9.8} + 0.9u_1 - 0.15u_3 \\ \dot{x}_2 &= [(0.73u_2 - 0.16)x_1^{9.8} - x_2]/10 \\ \dot{x}_3 &= [141u_3 - (1.1u_2 - 0.19)x_1]/85 \\ \dot{x}_4 &= (acs - x_4)/10 \\ \dot{x}_5 &= [1000(acs - x_4) - x_5]/10 \\ \dot{x}_6 &= (u_3 - x_6)/20 \\ \dot{x}_7 &= [3.55(1.1u_2 - 0.19)x_1 - x_7]/20 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} acs &= (1 - 0.001538x_3)(0.8x_1 - 25.6)/[x_3(1.0394 - 0.0012304x_1)] \\ qe &= (0.85u_2 - 0.147)x_1 + 45.59u_1 - 2.514u_3 - 2.096 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_1 &= x_1 \\ y_2 &= x_2 \\ y_3 &= 0.05(0.13073x_3 + 100acs + qe/9 - 67.975) \end{aligned} \tag{4.1}$$

여기서 x_1, x_2, x_3 는 상태변수로서, 각각 드럼 증기압력 $[kg/cm^2]$, 전기적 출력 $[MW]$, 그리고 드럼내의 유체의 밀도 $[kg/m^3]$ 를 나타내며 마지막 4 개의 상태변수는 연료 흐름에 있어서 변화에 대한 드럼 수위 Shrink/Swell 을 예측 하기위한 보조 상태들이다. y_3 는 드럼 수위(m), acs 는 증기의 질(Quality), qe 는 증발률(Evaporation rate)을 각각 나타낸다. u_1, u_2, u_3 는 각각 보일러 연료조절기의 위치(0 ~ 1 corresponds to 0 ~ 14 kg/s), 터빈으로의 증기의 양 조절 밸브 위치, 급수 조절기의 위치(0 ~ 1 corresponds to 0 ~ 140 kg/s)를 나타내고 이 값들은 모두 정규화된 값들이다. 그리고 다음과 같은 구동기의 크기및 변화율(Amplitude and Rate)에 대한 제약조건을 갖고 있다.

$$\begin{aligned} |\Delta u_1| &\leq 0.007 / \sec \\ -2 / \sec \leq |\Delta u_2| &\leq 0.2 / \sec \\ |\Delta u_3| &\leq 0.05 / \sec \end{aligned} \tag{4.2}$$

$$\begin{aligned} 0 < u_1 < 1 \\ 0 < u_2 < 1 \\ 0 < u_3 < 1 \end{aligned}$$

그림 3 은 이러한 구동기의 제약 조건을 블럭도로 표현한 것이다.

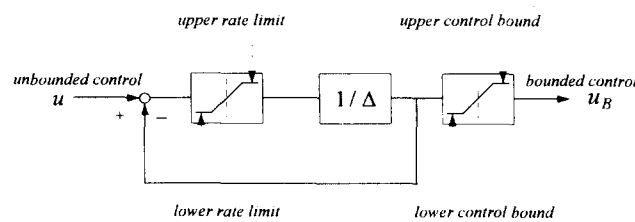


그림 3. 구동기 동력학
Fig3. Actuator dynamics

식(4.1)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 표시 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta\dot{x} &= A_c\delta x + B_c\delta u \\ \delta y &= C_c\delta x + D_c\delta u \end{aligned} \tag{4.3}$$

여기서,

$$\begin{aligned} A_c &= \frac{\partial f}{\partial x}(x^0, u^0), \quad B_c = \frac{\partial f}{\partial x}(x^0, u^0) \\ C_c &= \frac{\partial f}{\partial u}(x^0, u^0), \quad D_c = \frac{\partial f}{\partial u}(x^0, u^0) \end{aligned} \tag{4.4}$$

이며, x^0, u^0, y^0 는 동작점에서의 상태 벡터, 입력 벡터, 출력 벡터이고, $\delta x = x - x^0$, $\delta u = u - u^0$, $\delta y = y - y^0$ 이다.

또한, 이 논문에서 사용한 플랜트(Plant)의 공칭 동작점은 각각 $x^0 = [118.8 \ 85.063 \ 470.8]^T$, $u^0 = [0.4182 \ 0.7590 \ 0.5434]^T$,

$y^0 = [118.8\ \ 85.063\ \ 0.322]^T$ 이고, 이 값들로 부터 얻어진 연속형 상태공간 모델을 다시 1sec 로 이산화한 이산형 상태 공간 모델식은 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 0.9972 & 0 & 0 \\ 0.0765 & 0.9048 & 0 \\ -0.0076 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0.8987 & -0.3880 & -0.1498 \\ 0.0350 & 14.9803 & -0.0058 \\ -0.0034 & -1.5359 & 1.6594 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0000 & 0 \\ 0.0057 & 0 & 0.0048 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.2533 & 0.5610 & -0.0140 \end{bmatrix} \tag{4.5}$$

모의실험 결과는 그림 4 와 같다. 이 그림들은 식(4.5)의 선형화 모델에 식(4.2)의 제약조건이 있을때 제어기를 설계하여 비선형 보일러 모델에 적용한 비선형 모의실험 결과들이다. 그림 4.(a)부터 (c)는 비선형 보일러의 출력을, (d)부터 (e)는 제어 입력을, (f)부터 (h)까지는 제어 증분을 각각 나타낸 것이다. 모의실험 결과에서 보여 주듯이 구동기 입력측에 제약조건을 갖는 비선형 보일러 터빈의 경우, 여기서 설계한 다변수 모델예측제어기가 보일러의 기본적인 요구사항 및 구동기의 크기(Amplitude) 및 변화율(rate)의 제약조건을 잘 만족하면서 또한 좋은 성능을 가짐을 확인하였다.

5. 결 론

이 논문에서는 제약조건을 갖는 다변수 모델예측제어기를 비선형 보일러에 적용하는 문제를 다루었다. 먼저 CMPC 알고리즘을 정리하고, 이것을 Åström 의 산업용 보일러 모델에 적용하는 모의 실험을 수행하여 설계된 제어기의 성능을 확인하였다. 차후 과제로 보일러 터빈 시스템에 어떠한 이상(Fault)이 발생하였을 경우 이러한 이상에 대해서 견실할 뿐만 아니라 안정도문제도 해결할 수 있는 이상 허용 제어(Fault Tolerent Control)가 남아 있다.

후 기

이 논문은 "중형 보일러용 계장 시스템 개발" 과제의 2 차년도 연구 결과의 일부이다.

6. 참고 문헌

[1] Åström, K. J. and R. B. Bell (1987) Dynamic models for boiler turbine-alternator units: data logs and parameter estimation for a 160MW unit, *Report TFRT-3192*, Lund Institute of Technology, Sweden.

[2] Clarke, D. W., and C. Mohatadi and P. S. Tuffs(1987) Generalized predictive control-Parts 1 and 2. *Automatica*, 23, 137 - 160

[3] Clarke, D. W., and C. Mohatadi and P. S. Tuffs(1989) Properties of generalized predictive control. *Automatica*, 25, 859-875

[4] Clarke, D. W., and C. Mohatadi and P. S. Tuffs(1991) Contrained receding-horizon predictive control. *Proc. of IEE*, Pt D, 138, 347-354

[5] Garcia, G. E., and A. M. Moreshedi (1986) Quadratic programming solution of Dynamic Matrix Control(QDMC), *Chemical Engineering communication*, 46, 73-87

[6] Klema, V. C., and A. J. Laub (1980) The singular value decomposition: its computation and some applications, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 25, 164-176

[7] Li, W. C. and L. T. Biegler (1988) Process control strategies for constrained nonliear systems *Industrial and Engineering Chemical Research*, 27, 1421-1433

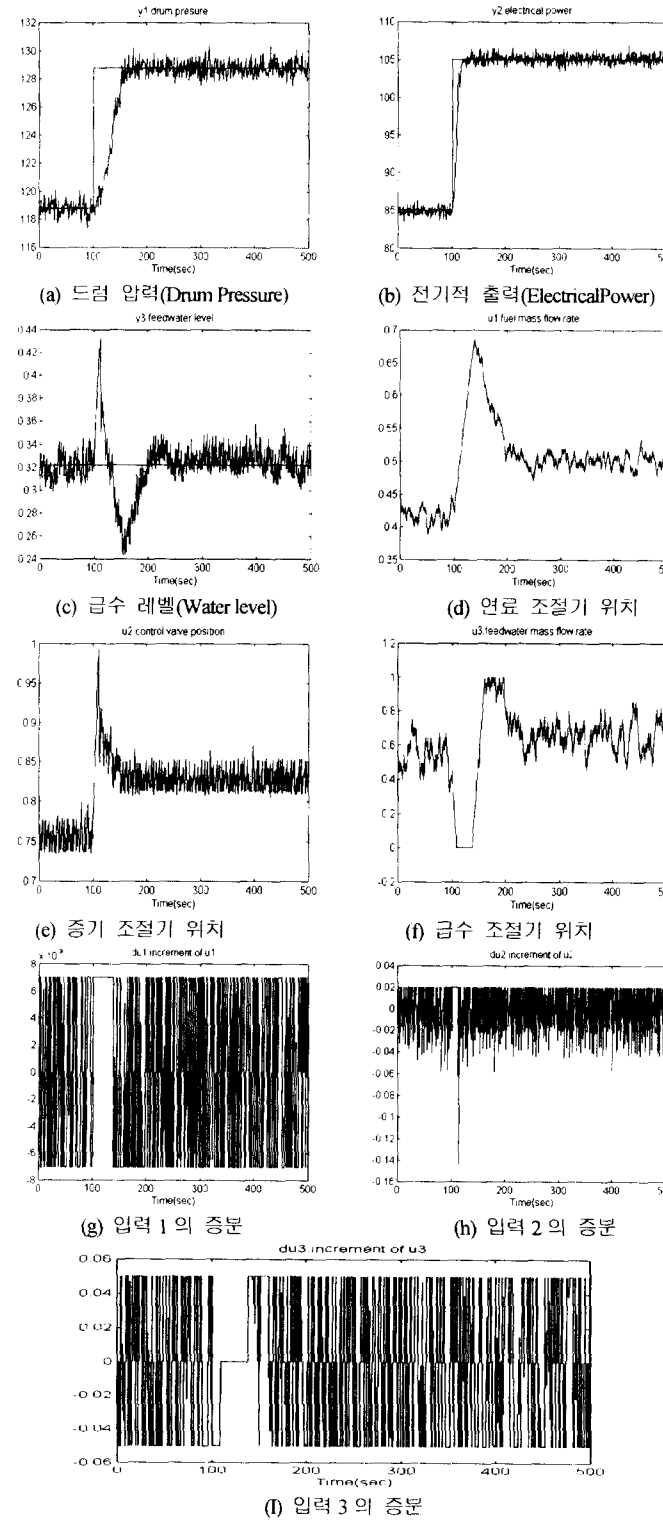
[8] Tham, M. T. (1985) Some Aspects of Multivariable Self-tuning Control, *PhD. Thesis*, Univ. of Newcastle upon Tyne, UK.

[9] Tsang, T. T. C., and D. W. Clarke(1988) Generalized predictive control with input constraints, *Proc. IEE*, PtD, 135, 451-460

[10] Wilkinson, D. J., A. J. Morris and M. T. Tham (1990) Constrained multivariable predictive control(a comparison with QDMC), *Proc. of the American Control Conference*, San Diego, California, U.S.A, 1620-1625

[11] Wilkinson, D. J., A. J. Morris and M. T. Tham (1994) Multivariable constrained predictive control(with application to high performance distillation), *International Journal of Control*, Vol.59, No.3 841-862

[12] David Clarke (1994) *Advances in Model Based Predictive Control*, Oxford University Press



(a) 드럼 압력(Drum Pressure) (b) 전기적 출력(ElectricalPower)

(c) 급수 레벨(Water level) (d) 연료 조절기 위치

(e) 증기 조절기 위치 (f) 급수 조절기 위치

(g) 입력 1 의 증분 (h) 입력 2 의 증분

(I) 입력 3 의 증분

그림 4. 모의실험 결과: 보일러 출력, 제어 입력, 제어 증분
Fig 4. Simulation result: Output, Input, Conrol increment