

# 증기 발생기 수위제어를 위한 모델예측제어기 설계

論 文

50D-8-3

## Design of Model Predictive Controller for Water Level Control in the Steam Generator of a Nuclear Power Plants

孫 德 鉉\* · 李 昌 求\*\*

(Duk-Hyun Son · Chang-Goo Lee)

**Abstract** - Factors leading to poor control of the steam generator in a nuclear power plant are nonminimum phase characteristics, unreliable of flow measurements and nonlinear characteristics, which increase more at low power(below 20%) operation. And the study of problems for water level control in the steam generator is that design water level controller only one power range, not entire. This paper introduces a model predictive control(MPC) algorithm for solving poor control factors and quadratic programming(QP) for solving input constraints. Also presents the design method of stable model predictive controller in the entire power range. The simulation results show the efficiency of proposed MPC controller by comparing with PI controller, and effect of the design parameters.

**KeyWords** : quadratic programming, model predictive control, steam generator, gain-scheduling.

### 1. 서 론

원자력 발전사고의 60% 이상이 발전을 시작할 때와 저출력 운전시에 발생하는데, 이는 증기발생기의 수위제어와 그 부속장치에 관련되었다는 것은 널리 알려진 사실이다. 하지만 현실적으로 저출력 운전시 증기발생기에 일어나는 비최소위상 특성(swell 과 shrink 현상), 급수유량과 증기유량 측정의 부정확성, 비선형 특성 그리고 입력의 제한조건 등은 수위제어를 어렵게 한다. 이러한 이유 때문에 아직도 현장에서는 저출력 운전시 숙련된 기술자에 의한 수동 운전이 의존하고 있는 실정이다. E. Irving 에 의해 증기발생기의 수위제어[1]가 제안된 이래 지금까지 fuzzy 제어기[2][3]와 적응제어기[4]등을 이용한 많은 연구가 이루어져 왔다. 그러나 기존의 연구는 단일 모델을 이용한 수위제어에 치우침으로써 전 출력 구간에서의 수위제어를 하는데 많은 한계를 드러냈다. 또한 입력의 제한 조건을 고려하지 않음으로써 실제 시스템에 적용 할 수 있는지에 대한 의구심을 불러일으키기도 하였다.

일반적으로 모델예측제어기는 quadratic programming (QP)방법을 이용하여 시스템에 존재하는 제한조건 문제를 체계적으로 해석하는데 유용한 제어기이며 시스템의 비선형성이나 불확실성에도 강인한 제어기[5][7]로 알려져 왔다. 이에 본 논문에서는 증기발생기에 존재하는 입력의 제한조건을 만족하면서 저출력 운전시 증기발생기 수위제어에 발생하는 여

러 제어상의 문제점을 해결하기 위한 모델예측제어기를 설계한다. 최적의 성능을 내는 모델예측제어기를 설계하기 위해서는 적절한 예측모델의 선정과 출력예측구간, 제어입력구간, 가중치 등의 설계변수들에 관한 적절한 동조가 있어야 한다. 본 논문에서는 기존 연구의 단점인 단일 모델이 아닌 전 출력 구간에서의 증기발생기 수위제어기 설계를 위해 이득 조절법을 도입하여 터빈의 power 변화에 따른 전 출력 구간에서의 모델예측제어기를 설계한다. 또한 이를 현장에 사용되고있는 PI 제어기와 성능을 비교하여 모델예측제어기의 우수성을 확인한다.

### 2. 증기 발생기 모델링

#### 2.1 증기발생기의 동특성

가압 경수로로는 원자로, 증기발생기 및 터빈으로 구성된 대규모 시스템으로 본 연구의 대상인 증기발생기의 구조는 그림 1과 같다. 증기발생기 수위의 측정 범위는 두 가지가 있는데 좁은 영역의  $N_{ge}$ 와 넓은 영역의  $N_{gl}$ 로 나타낸다. 하지만 제어입력은 오직 급수유량 하나이므로 두 수위 제어영역 중의 하나만이 정상상태 오차를 가지고 독립적으로 제어된다.

일반적으로 좁은영역의 수위를 제어대상으로 선택하며 이와 똑같은 개념으로 넓은 영역의 수위제어도 가능하다. 증기발생기내의 수위는 급수의 유량과 발생하는 증기량의 평형에 의하여 조절되는데, 과도상태에서 소위 swell 현상과 shrink 현상이라는 역반응 현상이 발생하여 비최소위상 특성을 갖는다. 제어기의 성능은 제어대상 플랜트에 대한 모델의

\* 準 會 員 : 全 北 大 制 御 計 測 工 學 科 碩 士 課 程

\*\* 正 會 員 : 全 北 大 電 子 情 報 工 學 部 副 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 2001年 4月 12日

最 終 完 了 : 2001年 7月 3日

정확성에 크게 의존하기 때문에 무엇보다도 모델링이 매우 중요하다. 증기발생기의 모델은 매우 복잡하고 비선형성을 갖고 있기 때문에 이를 기반한 제어를 설계하기가 어렵다. 따라서 모델예측제어를 설계하기 위해서는 무엇보다도 모델이 단순하면서 증기발생기의 주요 동특성을 표현하여야 하는데, 본 논문에서는 입력의 제한조건을 고려하면서 또한 증기발생기내에서 수위제어에 영향을 미치는 요소들을 적절히 나타낸, EDF (Electric de France)에서 제안한 모델을 연구대상 모델로 선정하였다.

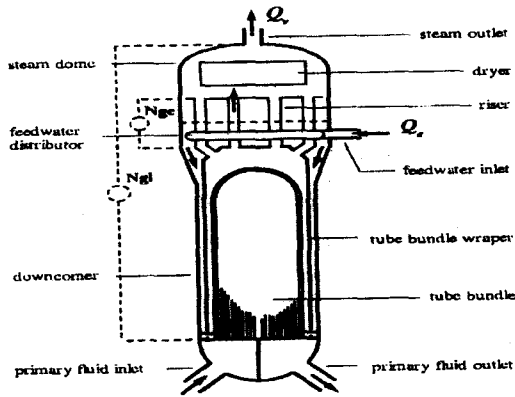


그림 1. 증기발생기 블록도  
Fig 1. Schematic diagram of a steam generator

2. 2 증기발생기의 모델링

EDF(Electric de France) 원전모델에서는 tube-bundle 영역으로 들어오는 물의 유량 ( $Q_{ef}$ )과 증기발생기 밖으로 나가는 증기와 물의 혼합 양 ( $Q_{GV}$ )이 같다는 가정하에 다음과 같은 식이 성립한다.

$$y(s) = \frac{1}{T_n s} (Q_{ef}(s) - Q_{GV}(s)) \quad (1)$$

증기발생기로 들어오는 급수유량  $Q_{ef}$  는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{ef}(s) = \frac{1}{(1 + \tau s)(1 + T_h s)} Q_e(s) \quad (2)$$

여기에서  $1/(1 + \tau s)$ 는 급수유량의 밸브동력을 나타내는 것이며,  $1/(1 + T_h s)$ 는 전달되는 물의 질량에 대한 동력을 나타낸 것이다. 그리고  $Q_e$  는 급수유량비율이다.

증기발생기로부터 빠져나가는 물과 증기의 혼합 양  $Q_{GV}$  는 터빈에서 요구되어지는 증기의 양  $Q_v$  와 관련이 있는데, 이를 나타내면 식(3)과 같다.

$$Q_{GV} = \frac{1 - F_g T_g s}{1 + T_g s} Q_v(s) \quad (3)$$

여기에서  $1/(1 + T_g s)$ 는 저주파 필터이며  $1 - F_g T_g s$  는 swell 현상과 shrink 현상에 의한 비최소위상특성의 크기를 나타내는 항이다. 식 (2)와 (3)를 식(1)에 대입하여 수위  $y(s)$  를 급수유량비율  $Q_e$ , 증기요구량  $Q_v$ 로 나타내면 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(s) = \frac{1}{T_n s} \left( \frac{Q_e(s)}{(1 + \tau s)(1 + T_h s)} - \frac{1 - F_g T_g s}{1 + T_g s} Q_v(s) \right) \quad (4)$$

- $\tau$  : 급수밸브동력 시정수
- $T_h$  : 전달되는 물의질량 시정수
- $T_n$  :  $N_{ge}$ 의 적분 시정수
- $T_g$  :  $Q_{GV}$  와  $Q_v$  사이의 관계 시정수
- $F_g$  :  $Q_{GV}$  와  $Q_v$  사이의 비최소위상을 나타내는 시정수
- $s$  : 라플라스 상수

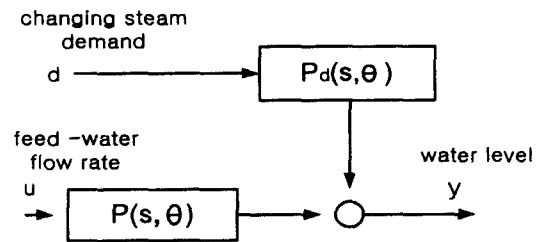


그림 2. power 변화에 따른 증기발생기의 모델링  
Fig. 2. Modeling of steam generator by power varying

그림 2는 터빈의 power 변화에 따른 증기발생기의 모델변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 제어의 목적은 입력으로 사용되는 급수유량 비율을 이용하여 외란인 증기요구량이 증기발생기의 수위에 영향을 미치지 않도록 하는 것임을 알 수 있다. 이를 수학적으로 표현하면 식(4)를 식(5)와 같은 선형 시변시스템 형태로 변환 할 수 있다.

$$y(s) = P(s, \theta)u(s) + P_d(s, \theta)d(s) \quad (5)$$

- $u(s)$  : 급수유량 비율
- $d(s)$  : 증기유량 비율
- $s$  : laplace 상수
- $\theta$  : power 변화량

식(5)를 상태공간 함수 형태로 변환하면 식(6)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(\theta)x(t) + B(\theta)u(t) + B_d(\theta)d(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (6)$$

$$A(\theta) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_n} \\ 0 & -\frac{1}{T_h} & 0 & -\frac{1}{T_n} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_g} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\tau} \end{bmatrix} \quad B(\theta) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{\tau} \end{bmatrix}$$

$$B_d(\theta) = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_n} \\ 0 \\ \frac{1+F_g}{T_n} \\ 0 \end{bmatrix} \quad C = [1 \ 1 \ 1 \ 0]$$

식(6)에서 제어입력  $u(t)$  의 크기는 물리적 특성상 다음과 같은 제한조건을 갖는다.

$$0(\%) \leq u(t) \leq 100(\%) \quad (7)$$

증기발생기는 심한 비선형 특성을 갖는 플랜트이기 때문에 제한조건을 갖는 선형 모델예측제어를 적용하기 위해 선형화 과정을 거친다. 증기발생기의 모델을 선형화하기 위해 터빈의 power 변화에 따른 모델오차식을 식(8)과 같이 정의한다.

$$e[\theta_1, \theta_2] = \left\| \frac{P(s, \theta_2) - P(s, \theta_1)}{P(s, \theta_1)} \right\|_{H_\infty} \quad (8)$$

여기에서  $\theta_1 \leq \theta_2$  이며  $\theta$  는 터빈의 power level이다. 식(8)에 의한 모델오차를 0.2로 설정을 한 후 식(5)를 원천 터빈의 power 변화를 기준으로 하여 모델의 선형화를 하면 식(6)의 파라미터 변화는 표 1과 같다.

표 1 Power 변화에 따른 증기발생기의 모델계수  
Table 1 Model parameter of steam generator by power varying

power level (%)	3.2	4.1	9.5	24.2	30	50	100
$T_n$	5.14	8.00	9.00	6.29	5.71	5.71	5.71
$F_g$	13.00	18.00	10.00	4.00	4.00	4.00	4.00
$T_h$	24.29	8.00	4.29	1.43	1.14	0.71	0.71
$\tau$	1.43	1.43	1.43	4.29	4.29	4.29	4.29

$T_g = 1.429$ 이며 power level에 따라 변하지 않는 상수값을 갖는다.

그림 3은 power 가 변함에 따른 증기발생기의 기준수위를 나타낸 그림이다. 기준수위는 저출력에서는 강한 비최소위상 특성 때문에 수위가 낮아지며 고출력에서는 이 특성이 작아짐으로 해서 기준수위가 일정해짐을 알 수 있다.

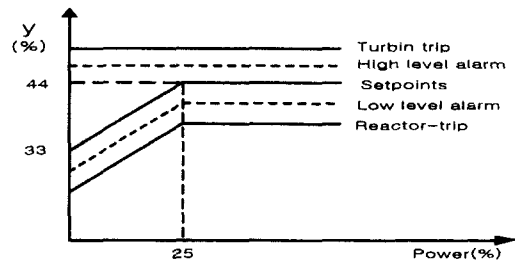


그림 3. 증기발생기의 기준수위

Fig. 3. Set-point of steam generator

### 3. 모델예측제어기 설계

#### 3.1 모델예측

모델예측 제어기 설계에서 사용되는 모델은 기본적으로 Impulse response model, Step response model, Transfer function model, State space model 등이 있다. 본 논문에서는 다변수 제어 시스템에서 직접적으로 적용할 수 있으며 또한 불안정한 시스템에도 적용할 수 있는 상태공간 모델을 예측모델로 선정하였다. 또한 이 모델은 페루프의 해석에 용이하며 온라인 연산이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 무엇보다도 가장 큰 장점은 linear quadratic(LQ)나 Kalman filtering 등의 선형시스템 제어이론을 적용하기 쉽다는 점이다.

#### 3.2 모델예측제어기

일반적인 이산시간 모델을 다음과 같이 정의하자.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \overline{A}(\theta)x(k) + \overline{B}(\theta)u(k) + \overline{B}_d(\theta)d(k) + n_1 \\ y(k) &= Cx(k) + n_2 \end{aligned} \quad (9)$$

$d(k)$  : 측정 가능한 외란  
 $n_1, n_2$  : 측정 불가능한 외란

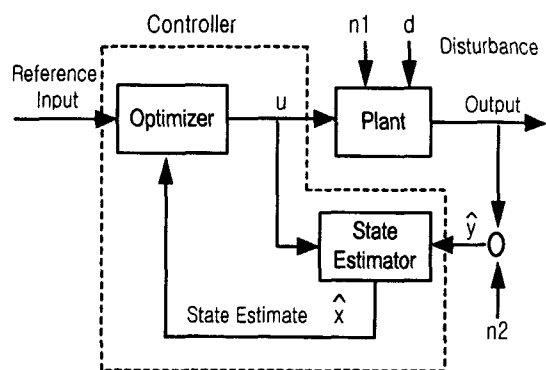


그림 4. 기본적인 MPC 구조도

Fig. 4. Basic structure of MPC

그림 4에서 State Estimator 는 이산시간  $k$ 에서  $i$ 번째의

예측된  $x(k+i+1|k)$ ,  $y(k+d|k)$  구하는 것과 같으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x(k+i+1|k) &= \overline{A}(\theta)x(k+d|k) + \overline{B}(\theta)u(k+1|k) \\ y(k+d|k) &= Cx(k+d|k) \end{aligned} \quad (10)$$

$i=1, 2, \dots, p$

Optimizer 는 Plant로 들어오는 제어입력을 구하는 것인데 이는 외란과 잡음이 존재하는 시스템에 대하여 식(11)과 같은 성능지표(Cost Function)을 최소화하는 제어입력을 구하는 것이다.

$$\min_{u(k+d|k), i=0, 1, \dots, m-1} J_p(k) \quad (11)$$

$$\begin{aligned} J_p(k) &= \sum_{i=1}^p (r - y(k+i|k))^T \Gamma_y (r - y(k+i|k)) \\ &+ \sum_{i=0}^{m-1} u(k+i|k)^T \Gamma_u u(k+i|k) \end{aligned}$$

- $r$  : 기준값
- $\Gamma_y$  :  $P \times P$  symmetric positive semi definite matrices
- $\Gamma_u$  :  $M \times M$  symmetric and positive definite matrices
- $P$  : 출력 예측구간(prediction horizon)
- $M$  : 제어입력 구간(control horizon)

식(11)과 같은 성능지표를 최소화 하는 값을 구하는 데 있어서 다음과 같은 제한 조건을 만족하는 제어입력을 구하여야 한다.

<제어입력과 제어입력 증분에 대한 제한조건>

$$u_{j, \min} \leq u(k+i|k) \leq u_{j, \max} \quad (12)$$

$i=0, 1, 2, \dots, m-1, \quad j=1, 2, \dots, n_u$

$$\begin{aligned} |\Delta u_j(k+i|k)| &\leq \Delta u_{j, \max} \\ i=0, 1, 2, \dots, m-1, \quad j=1, 2, \dots, n_u \end{aligned} \quad (13)$$

$\Delta u(k+i|k) \equiv u(k+i|k) - u(k+i-1|k)$

<출력과 상태변수에 대한 제한조건>

$$y_{j, \min} \leq y(k+i|k) \leq y_{j, \max} \quad (14)$$

$i=0, 1, 2, \dots, m-1 \quad j=1, 2, \dots, n_y$

$$x_{\min} \leq x(k+i|k) \leq x_{\max} \quad (15)$$

$i=0, 1, 2, \dots, m-1 \quad j=1, 2, \dots, n_x$

(12)와 (13)을 만족하는 식(11)의 해를 찾는 문제는 일반적인 방법으로는 매우 어렵다. 따라서 이 문제를 lagrange multiplier를 이용하여 제한조건이 없는 문제로 재해석한다. 본 논문의 연구 대상인 원전 증기발생기는 플랜트의 특성상 입력크기의 제한 조건을 가지므로 이에 맞는 문제 해석을 위해 다음과 같은 hamiltonian을 정의하자.

$$\begin{aligned} H(x(k), u(k), \lambda(k), k) &= \frac{1}{2} \|y(k) - r\|_{\Gamma}^2 \\ &+ \frac{1}{2} \|u(k)\|_{\Gamma_u}^2 + \lambda^T (A(\theta)x(k) + B(\theta)u(k)) \end{aligned} \quad (16)$$

여기서  $\lambda$  는 lagrange multiplier 이며  $\Gamma_u, \Gamma_y$  는 입력과 출력에 대한 가중치이다. 식(11)을 만족하는 제어입력을  $u^*$  라 하면,  $u^*$ 를 구하기 위한 필요조건은 다음과 같다.

$$x^*(k+1) = \frac{\partial H}{\partial \lambda} \quad (17-1)$$

$$\lambda^*(k+1) = -\frac{\partial H}{\partial x} \quad (17-2)$$

$$\begin{aligned} H(x^*(k), u^*(k), \lambda^*(k), k) \\ \leq H(x^*(k), u(k), \lambda^*(k), k) \end{aligned} \quad (17-3)$$

식 (16)을 최소화 하는  $u^*$  는 식(18)을 만족하도록 구한다.

$$\frac{\partial H}{\partial u}(x^*(k), u^*(k), \lambda^*(k), k) = 0 \quad (18)$$

식 (18)을 만족하는  $u^*$ 는  $1 \times M-1$  의 행렬이 될 것이다. 하지만 이산시간  $k$ 에서의 제어입력은 첫 번째  $u^*(k)$  만 사용이 되고 다음 이산시간  $k+1$ 에서는 새로운  $u^*(k+1)$ 가 생성된다. 즉 새로운  $\hat{x}(k+1)$ ,  $\hat{y}(k+1)$ 가 업데이트되는 것이다. 또한  $P > M$ 인 구간에서는 제어입력증분  $\Delta u(k)$ 는 변하지 않는다고 가정하는데, 즉  $k+M-1$ 시간 후에는  $u(k+i|k) = u(k+M-1|k)$ ,  $i \geq M$ 이다. 이를 나타낸 것이 그림 5이다.

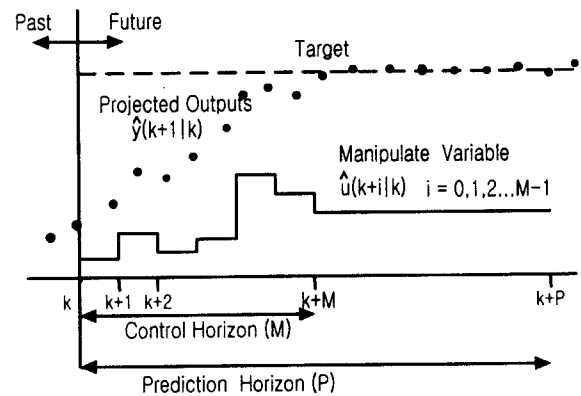


그림 5. 이산 시간  $k$ 에서의 최적화

Fig. 5. Optimization of discrete time  $k$

모델예측제어의 성능에 주요한 영향을 미치는 변수들은 미래출력들의 범위로 정의되는 미래예측구간(prediction horizon)과 원하는 제어목적 달성을 위한 구간으로 정의되는 제어구간(control horizon), 그리고 가중치 등이 있는데 이들

변수의 적절한 동조가 제어기 성능을 결정한다. 그리고 여기에서 구해지는 제어입력은 오직 첫 번째 제어입력  $u(k)$ 만 사용이 되고 다음 샘플링 시간  $k+1$ 에서는 새로운  $\hat{y}(k+1)$ ,  $\hat{x}(k+1)$ 가 업데이트된다. 이 때문에 모델예측제어기를 RHC (receding horizon control) 또는 MHC(moving horizon control)이라고도 명칭한다.

### 3. 3 Measurement Update

외란이나 모델링 오차 그리고 측정시의 잡음 등에 의한 측정오차로 인해 이산시간  $k$ 에서의 플랜트의 출력  $y(k)$ 은 실제 플랜트의 출력  $\hat{y}(k)$ 와 차이가 발생하게 된다. 이를 보상해주기 위해 퍼지 필터를 이용하였다.

$$\hat{x}(k) = x(k) = x(k-1) + \gamma(k)(\hat{y}(k) - y(k-1)) \quad (19)$$

여기서  $\gamma(k)$ 는 퍼지필터 이득이며 다음과 같이 구한다. 먼저 실제값과 추정값의 오차를 다음과 같이 정의 하자.

$$e(k) = \hat{y}(k) - y(k-1) \quad (20)$$

오차의 변화량을 다음과 같이 정의하자.

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \quad (21)$$

오차변화량에는 미분 연산자가 포함되어있기 때문에 고주파영역에서는 외부 외란의 증폭작용을 하므로 이를 미리 다음과 같이 보상해 준다.

$$\Delta e_f(k) = e_f(k) - e_f(k-1) \quad (22)$$

여기에서  $e_f$ 는 필터 오차이다.

오차와 오차의 변화량에 대한 멤버쉽함수를  $u_e(e(k))$ ,  $u_{\Delta e}(\Delta e(k))$ 라 하면 두 함수의 최소연산자를 다음과 같이 구한다.

$$u_\gamma(e(k), \Delta e(k)) = \min(u_e, u_{\Delta e}) \quad (23)$$

식(23)으로부터 퍼지필터 이득은 다음과 같이 구해진다.

$$\gamma(k) = 1 - u_\gamma \quad (24)$$

### 3. 4 모델예측제어기를 이용한 전 출력 구간의 증기발생기수위제어

증기발생기는 비 선형성이 강하므로 일반적인 모델예측 제어기로는 전 출력 구간에서 좋은 성능을 내는 제어기를 설계하기는 어렵다. 본 논문에서는 이를 극복하기 위해 이득 조절법을 이용한 모델예측 제어기를 설계하고자 한다. 이득 조

절법을 적용하려면 적절한 스케줄링 신호를 선택하여야 하는데, 본 논문에서는 power 요구량에 따른 증기유량비율을 스케줄링 신호로 선택하였다. 이득 조절법을 적용한 증기발생기 수위제어 구성도는 그림 6과 같다. 그리고 비선형 모델의 선형화에 의한 오차가 플랜트의 성능과 안정성에 큰 영향을 주지 않을 정도의 범위에서 스케줄링 신호를 기준으로 플랜트의 동작 범위를 적당히 나누어야 하는데 이는 모델오차를 기준으로 하여 증기발생기의 선형화를 한 표1을 기준으로 하였다.

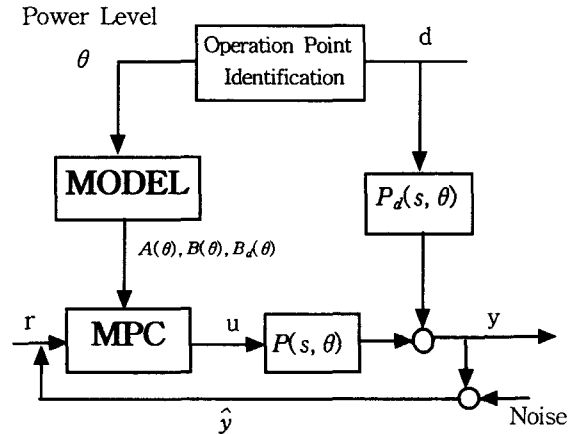


그림. 6. 모델예측제어기를 이용한 전 출력 구간에서의 증기 발생기 수위제어 구성도

Fig. 6. Schematic diagram of level control in the steam generator by model predictive controller in the entire power range

### 3. 5 PI제어기를 이용한 수위제어

증기발생기의 수위제어를 하는데 있어 저 출력(20%미만)에서 발생하는 비 최소위상 특성과 제어입력으로 사용하는 급수유량비율, 그리고 측정가능한 외란인 증기유량비율의 측정값이 부정확 하기 때문에 제어상의 많은 문제점이 있다. 증기발생기의 일반적인 PI제어기의 구조는 그림 7과 같다.

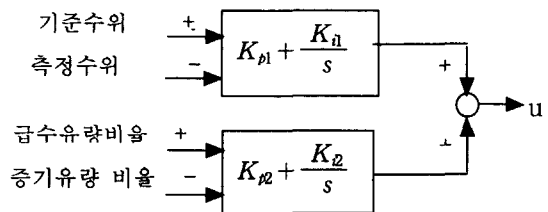


그림. 7. 일반적인 PI제어기 구조도

Fig. 7. Basic structure of PI controller

제어입력은, 측정 오차가 크기 때문에 유량측정 신호는 사용하지 않고 기준 값 과 출력 값의 오차를 이용하여 구한다. 때문에 제어입력은 식(25)과 같이 나타낼 수 있다.

$$u(k) = u(k-1) + K_p[err(k) - err(k-1)] + \frac{h}{2K_i}[err(k) + err(k-1)] \quad (25)$$

여기에서  $err(k) = r - y(k)$ ,  $r$ : 기준수위  
 $K_p$ : 비례이득값,  $K_i$ : 적분이득값 이다.

표 2 Power 변화에 따른 PI 제어기의 이득  
 Table 2 Gain of PI controller by power varying

power level(%)	3.2	4.1	9.5	24.2	30	50	100
$K_p$	0.25	0.4	1.1	1.3	1.3	1.3	1.3
$K_i$	1800	1800	2200	2500	2500	2500	2500

#### 4. Simulation

본 논문에서는 지금까지의 단일모델에 의한 연구의 단점을 극복하기 위해 이득 조절법을 사용하여 power 변화에 따른 증기발생기의 전출력 구간을 대상으로 연구를 진행하였다. 증기발생기의 전출력 구간에서의 동작 성능을 보이기 위해 300 샘플링시간마다 모델변화를 순차적으로 3.2%에서 100% 까지 변화하는 것으로 가정하였으며 이에 따른 기준수위입력의 변화를 그림 5와 같이 가정하여 step 입력을 인가하였다. 또한 모델예측제어기의 설계변수들의 영향을 관찰하기 위해 제어입력 구간과 입력 가중치에 변화를 인가하였으며 여기에서 얻어진 최적의 설계변수들을 이용하여 모델예측 제어기를 설계하고 이를 현장에 사용되는 PI 제어기와 비교를 하였다.

먼저 그림 8은 출력예측구간(P)은 50, 제어입력구간(M)은 10 인 상태에서 제어입력가중치( $\Gamma_u$ )를 0.8, 출력가중치( $\Gamma_y$ )를 1로 설정한 후 실험을 했을 시의 수위제어 결과이며 점선은 기준수위를 나타낸 것이다. 그림 9는 이때의 제어 입력이며 점선은 측정 가능한 외란인 증기유량비율이다. 수위는 약간의 비최소위상 특성이 존재하나 빠르게 기준수위에 추종을 하며 제어입력은 제한조건을 만족하면서 안정적으로 증기유량 비율을 따라가는 것을 알 수 있다.

그림 10은 제어입력구간의 변화에 따른 출력과 입력의 변화를 관찰하기 위해 출력예측구간(P)을 50, 제어입력가중치( $\Gamma_u$ )는 0.8, 출력가중치는( $\Gamma_y$ ) 1인 상태에서 제어입력구간(M)을 2로 설정하여 실험을 수행했을 시 수위제어 결과이며 그림 11은 이때의 제어입력이다. 제어입력 구간의 크기를 줄임으로 해서 수위와 제어입력의 오버슈트(over-shoot)가 줄어들음을 알 수 있다.

그림 12는 입력가중치의 변화에 따른 출력과 제어입력의 변화를 관찰하기 위해 출력예측구간(P)을 50, 제어입력구간(M)을 10, 제어입력가중치( $\Gamma_u$ )를 0.2, 출력가중치( $\Gamma_y$ )는 1로 했을시의 수위제어 결과이며 그림 13은 이때의 제어입력을 나타낸 것이다. 수위는 적절히 기준수위를 추종하나 제어입력에서 순간적인 오버슈트(over-shoot)현상이 상당히 크게 발생하는 것을 알 수 있다.

지금까지의 실험 결과에 의해 출력예측구간(P)을 50, 제어입력 구간(M)은 오버슈트가 작으며 기준 제어입력인 증기발생유량에 적절한 추종을 위해 2로 설정을 하였다. 이는 제어입력구간을 10으로 할 때보다 빠른 계산을 수행한다. 그리고 제어입력 가중치( $\Gamma_u$ )는 0.8, 출력가중치( $\Gamma_y$ )는 1로 설정을 한 후 이를 PI제어기의 수위제어결과와 비교를 하였다.

그림14는 모델예측제어기와 PI 제어기와의 수위제어 결과를 비교한 그림이다. 저출력에서는 PI 제어기성능이 매우 떨어짐을 알 수 있으나 고출력(20%이상)에서는 만족할 만한 PI 제어기의 성능을 가짐을 알 수 있다. 이는 저출력에서의 비선형과 플랜트 파라미터의 불확실성 때문에 적절한 PI 이득을 구할 수 없기 때문이다. 그러나 제안한 모델예측 제어기는 모델의 불확실성, 외란등에도 불구하고 저출력에서 안정적인 제어 성능을 가짐을 알 수 있다. 그림 15는 모델예측제어기와 PI제어기의 제어입력을 나타낸 그림이다. 모델예측제어기의 제어입력이 PI 제어기의 제어 입력보다 안정적임을 알 수 있다.

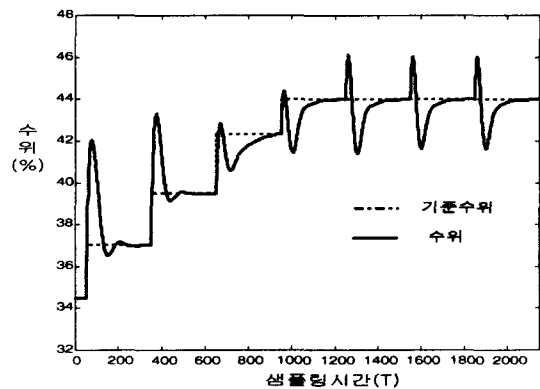


그림. 8. 모델예측제어기(P=50,M=10,  $\Gamma_u=0.8, \Gamma_y=1$ )의 수위제어결과.

Fig. 8. Result of water level control by MPC ( P =50, M =10,  $\Gamma_u=0.8, \Gamma_y=1$ )

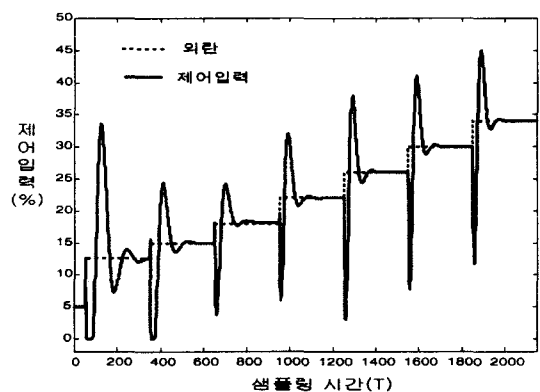


그림. 9. 모델예측제어기의 제어입력 ( P=50,M=10,  $\Gamma_u=0.8, \Gamma_y=1$ )

Fig. 9. Control input of MPC ( P =50, M=10,  $\Gamma_u=0.8, \Gamma_y=1$ )

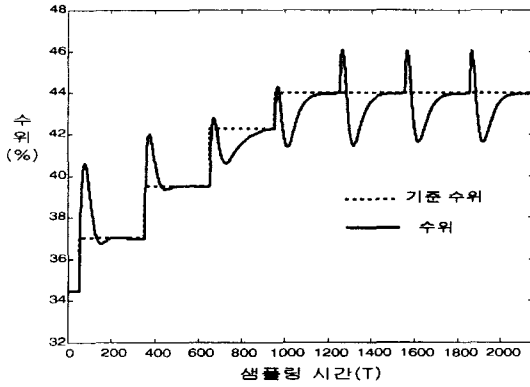


그림 10. 모델예측 제어기( $P=50, M=2, \Gamma_u=0.8, \Gamma_y=1$ )의 수위제어 결과.  
 Fig. 10. Result of water level control by MPC ( $P=50, M=2, \Gamma_u=0.8, \Gamma_y=1$ )

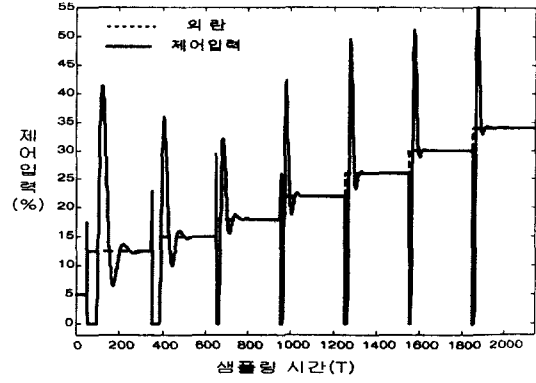


그림 13. 모델예측제어기의 제어입력 ( $P=50, M=2, \Gamma_u=0.2, \Gamma_y=1$ )  
 Fig. 13. Control input of MPC ( $P=50, M=2, \Gamma_u=0.2, \Gamma_y=1$ )

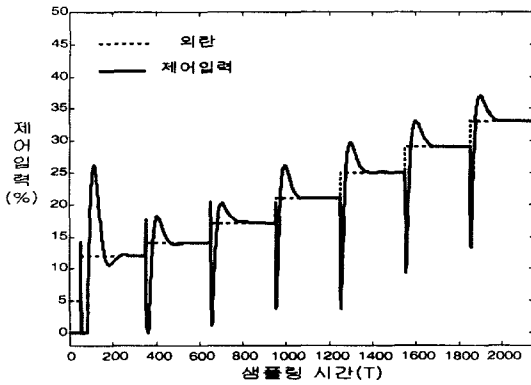


그림 11. 모델예측제어기의 제어입력 ( $P=50, M=2, \Gamma_u=0.8, \Gamma_y=1$ )  
 Fig. 11. Control input of MPC ( $P=50, M=2, \Gamma_u=0.8, \Gamma_y=1$ )

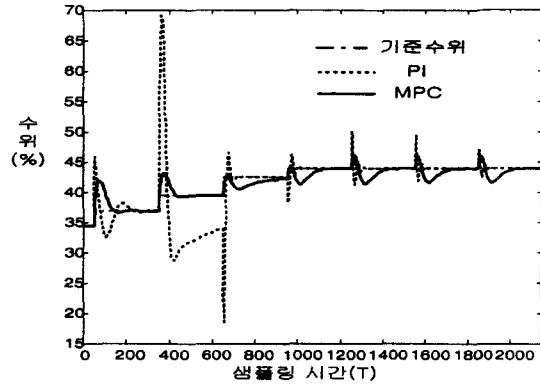


그림 14. 모델예측제어기( $P=50, M=2, \Gamma_u=0.8, \Gamma_y=1$ )와 PI제어기의 수위제어 결과  
 Fig. 14. Result of the result water level control MPC( $P=50, M=2, \Gamma_u=0.8, \Gamma_y=1$ ) and PI controller

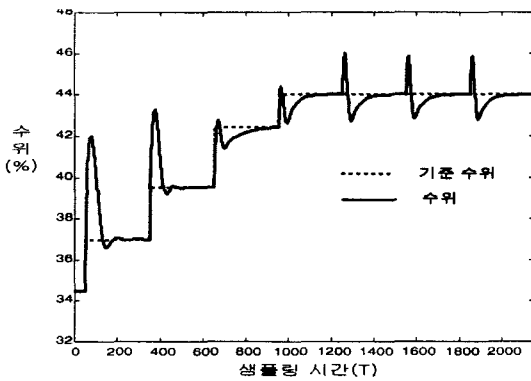


그림 12. 모델예측제어기 ( $P=50, M=2, \Gamma_u=0.2, \Gamma_y=1$ )의 수위제어결과.  
 Fig. 12. Result of level control by MPC ( $P=50, M=10, \Gamma_u=0.2, \Gamma_y=1$ )

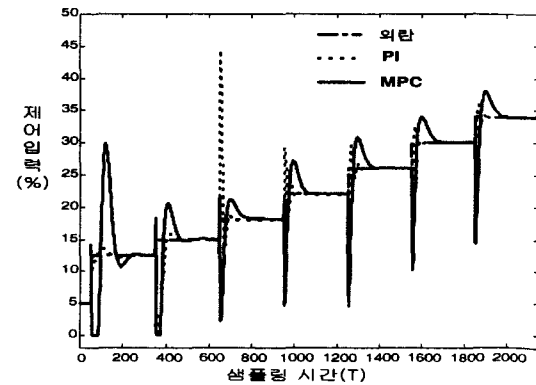


그림 15. 모델예측제어기 ( $P=50, M=2, \Gamma_u=0.8, \Gamma_y=1$ )와 PI 제어기의 제어입력  
 Fig. 15. Control input of MPC( $P=50, M=2, \Gamma_u=0.8, \Gamma_y=1$ ) and PI controller

5. 결 론

본 논문에서 제시한 제한조건이 있는 모델예측제어기를 이용한 원전 증기발생기 수위제어는 플랜트의 강한 비최소위상 특성과 비선형성, 그리고 입력의 제한조건에도 불구하고 매우 빠르면서도 적절한 수위제어가 됨을 볼 수 있었다. 그리고 모델예측제어기 설계시 고려해야 할 변수들, 즉 출력예측구간, 제어입력구간, 가중치 등의 변수들을 적절히 동조시킴으로 해서 보다 성능이 향상된 제어기를 설계할 수 있음을 알았다. 또한 PI 제어기보다 저출력에서의 성능이 우수함을 알았다. 현재 국내에서 일부 대학과 연구소를 중심으로 모델예측제어기의 상용화에 많은 연구가 진행되고 있으나 아직은 이를 현장에 적용하기에는 많은 문제점들이 있다. 무엇보다도 신뢰성에 대한 문제인데 앞으로 이 부분에 대한 많은 연구가 필요하며 또한 현장에 널리 상용되고 있는 PID 제어기와 서로 연계하여 사용할 수 있는 범용 MP-PID 제어기에도 많은 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

[1] E. Irving, C. Mjossec, and J.Tassart, "Toward efficient full automatic operation of the PWR steam generator with water level adptive control." in Proc. Int. Conf. Boiler Dynamics Contr. Nuclear Power Stations London, U.K 1980, pp.309-329  
 [2] Byung Hak Cho, No.H.C, "Design of Stability and Performance Robust Fuzzy Logic Gain Scheduler for Nuclear Steam Generator", IEEE TRANSACTION ON NUCLEAR SCIENCE. VOL 44, NO. JUNE 1997.

[3] MAN GYUN NA, "Design of Genetic Fuzzy Controller for the Nuclear Steam Generator Water Level Control". IEEE TRANSACTION ON NUCLEAR SCIENCE, VOL.45, NO.4, AUGUST 1998.  
 [4] MAN GYUN NA, " A Water Level Controller for Steam Generators Estimating the Flow Errors and The Water Level Quantity due to the Mass Capacity" Nuclear Technology, Vol.122, APR.1998.  
 [5] James B.Rawlings "Tutorial Overview of Model Predictive control" IEEE Control systems, Vol 20 No.3, June 2000.  
 [6] M. Morari and N.L.Ricker."Model Predictive Control Toolbox" The MathWorks. Inc.  
 [7] B. G. Vroemen, H.A.van Essen, A.A.van Steenhoven, J.J.Kok "Nonlinear Model Predictive Control of a Laboratory Gas Turbine Installation" Journal of Engineering for Gas Turbine and Power Vol.121 October 1999.  
 [8] Donald E.Kirk "Optimal control Theory An Introduction" Prentice Hall

감사의 글

본 연구는 1999년도 기초전력공학공동연구소 단기과제(과제번호: 99-지-15)지원에 의해 수행되었습니다

저 자 소 개



손 덕 현 (孫 德 鉉)  
 1973년 5월 22일 생. 1999년 전북대 제어계측공학과 졸업. 현재 동 대학원 제어계측공학과 석사과정.  
 Tel : 063-270-2476  
 E-mail : dhson@mail.chonbuk.ac.kr



이 창 구 (李 昌 求)  
 1958년 12월 25일 생. 1981년 전북대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1983년~1992년 한국전자통신연구소 선임연구원. 1996년 Alberta 대학 방문교수. 현재 전북대 전자정보공학부 부교수  
 Tel : 063-270-2476  
 E-mail : changgoo@moak.chonbuk.ac.kr