

일반화된 예측제어에 의한 가압경수형 원자로의 부하추종 출력제어에 관한 연구

전희영 박귀태 이종렬 박영환^o

고려대학교 대학원 전기공학과

Generalized Predictive Control of P.W.R. Nuclear Power Plant

Hee-Young Chun, Gwi-Tae Park, Jong-Yeol Lee, Young-Hwan Park^o

Department of Electrical Engineering
Korea University

ABSTRACT

This paper deals with the application of a Generalized Predictive Control (GPC) to a Pressurized Water Reactor (P.W.R) Nuclear Power Plant.

Generalized Predictive Control is a sort of Explicit Self-Tuning Control. Current self-tuning algorithms lack robustness to prior choices of either dead-time (input time delay of a plant) or model order. GPC is shown by simulation studies to be superior to accepted self-tuning techniques such as minimum variance and pole-placement from the viewpoint that it is robust to prior choices of dead-time or model order.

In this paper a GPC controller is designed to control the P.W.R. nuclear power plant with varying dead-time and through the designing procedure the designer is free from the constraint of knowing the exact dead-time.

The controller is constructed based on the 2nd order linear model approximated in the vicinity of operating point. To ensure that this low-order model describes the complex real dynamics well enough for control purposes, model parameters are updated on-line with a Recursive Least Squares algorithm.

Simulation results are successful and show the possibilities of the GPC control application to actual plants with varying or unknown dead-time.

1. 서 론

그동안 원자력 발전소의 제어계통을 설계하는데 있어서 여러가지 방법들이 시도되어왔다. 80년대 초까지 최적제어 이론을 이용하여 설계하는 방법이 주로 연구되어 왔으나, 미지 계통을 근사적으로 모델링하여 최적제어이론을 적용하였을때 원자력 발전소의 동특성이 갖는 비선형성과 파라미터의 시변성으로 인해 만족할 만한 효과를 얻지 못했다.

이에 따라 80년대 들어와서는 적응제어에 의해 원자력 발전소를 제어하려는 연구가 활발히 진행되어 왔다. 그간 기존모델 적응제어방법을 시도한 예로는 Bereznai와 Sinha[1], Moore와 Schweppe[2], 일본의 후쿠다[3], 볼란서의 Irving과 Mein[4]등의 경우가 있었고, 또한나의 대표적 적응제어 방법인 자기동조제어방법을 최초로 원자로 제어에 이용한 것은 1981년 Allidina[5]가 있었다. Allidina가 구성한 것은 최소 분산 자기동조제어기(Minimum Variance Self Tuning Controller)였는데 외란에 대해 성능이 좋지 않은 단점이 있었다.

1986년 G.T.Park과 G.H.Milley[6]의 논문들에서는 이러한 외란에 대한 문제점을 해결하려는 시도가 있었으며 일반화된 최소 분산 방법과 극배치방법을 이용한 자기동조제어 알고리즘을 개발하여 계통에 적용한 결과, 외란이 존재 하더라도 목표치에 잘 추종하는 좋은 특성을 얻었다.

위의 연구들에서는 원자로 계통의 시간지연과 차수가지지의 값인 것으로 가정하였으나, 실제적인 원자로 계통에서는 시간지연과 차수를 정확히 알기가 쉽지 않거나 가변적일 수 있으므로 이와같은 점들에 대해서도 고려가 된 제어기구조가 필요하다. 이에 본 연구에서는 이와같이 원자로계통의 시간지연과 차수를 정확히 모르는 경우에 대해서도 바람직한 제어동작을 하는 제어기를 일반화된예측제어(Generalized Predictive Control)로 구성하고자 하였다. 일반화된예측제어 방법은 D.W.Clarke등[15]에 의해 제안된 일종의 자기동조제어방법이며 다음과 같은 장점이 있다. 즉, 기존의 제어방식들 중에서 최소분산자기동조제어기는 입력의 시간지연값 가정에 대해 매우 민감한 단점이 있으며, 극배치 방식이나 LQG제어기의 경우는 계통 차수값의 선정에 대해 민감한 단점이 있다. 일반화된예측제어방법은 이러한 단점들을 해결한 방식으로, 입력의 시간지연값을 모르거나 또는 시간지연값이 변하는 계통에 대해서 뿐만 아니라 차수를 정확히 모르는 계통에 대해서도 사용이 가능하다.

2. 일반화된 예측제어기에 대한 이론적 고찰

2.1 계통모델의 선정

어떤 동작점을 전후로 동작하는 계통은, 그것이 비선형 계통일지라도 일반적으로 국부적으로 선형화된 이산치 모델로 나타낼 수 있다. 즉 다음과 같은 CARIMA (Controlled Autoregressive Integrated Moving Average) 모델로 나타낼 수 있다. (Tuffs and Clarke [15])

$$A(q^{-1})y(t) = q^{-d}B(q^{-1})u(t) + q^{-1}D(q^{-1})v(t) + \xi(t)/\Delta \quad (2-1)$$

여기서 $A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_nq^{-n}$
 $B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1} + \dots + b_nq^{-n}$
 $\xi(t)$: 상관관계가 없는(Uncorrelated) 랜덤 시퀀스
 $\Delta = 1 - q^{-1}$

2.2 출력 예측기 구성

j-번째(step) 앞선 출력의 예측치 $y(t+j|t)$ 를 유도하기 위해 (2-2)와 같은 Diophantine Equation을 생각한 다.

$$1 = E_j(q^{-1})A\Delta + q^{-j}F_j(q^{-1}) \quad (2-2)$$

식(2-1)의 양변에 $E_j\Delta q^j$ 를 곱하면 식(2-3)이 얻어진다.

$$E_jA\Delta y(t+j) = E_jB\Delta u(t+j-1) + E_j\xi(t+j) \quad (2-3)$$

식(2-2)로부터 유도된 관계식 $E_j(q^{-1})A\Delta = 1 - q^{-j}F_j(q^{-1})$ 을 식(2-3)에 대입하면 (2-4)식이 유도된다.

$$(1 - q^{-j}F_j(q^{-1})) y(t+j) = E_jB\Delta u(t+j-1) + E_j\xi(t+j) \quad (2-4)$$

(2-4)식을 정리하면 식(2-5)와 같다.

$$y(t+j|t) = E_j B \Delta u(t+j-1) + F_j y(t) + E_j z(t+j) \quad (2-5)$$

(2-5)식에서 $E_j(q^{-1})$ 의 차수는 $j-1$ 차이므로 $E_j(q^{-1})z(t+j)$ 는 미래에 얻어지는 데이터값들이 된다. 따라서 시간 t 까지 측정되어진 입출력값들과 미래의 입력값 $u(t+j)$, ($j \geq 1$)들에 의하여 예측할 수 있는 출력의 예측치는 식(2-6)으로 나타낼 수 있다.

$$y(t+j|t) = G_j \Delta u(t+j-1) + F_j y(t) \quad (2-6)$$

$$\begin{aligned} \text{여기에서 } G_j(q^{-1}) &= E_j(q^{-1})B \\ &= g_n q^{-n} + g_{n-1} q^{-(n-1)} + \dots \\ &\quad + g_{j-1} q^{-(j-1)} + \dots \\ &\quad + g_1 q^{-1} + g_0 \\ F_j(q^{-1}) &= f_m q^{-m} + f_{m-1} q^{-(m-1)} + \dots \\ &\quad + f_2 q^{-2} + f_1 q^{-1} + f_0 \end{aligned}$$

이러하면 (2-6)식은 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$y(t+j|t) = g_0 \Delta u(t+j-1) + g_1 \Delta u(t+j-2) + \dots + g_{j-2} \Delta u(t+1) + g_{j-1} \Delta u(t) + f(t+j)$$

여기에서 $f(t+j)$ 는 시점 t 까지의 과거의 입출력 데이터로부터 알 수 있는 $y(t+j)$ 의 신호성분으로 다음과 같다.

$$f(t+j) = g_j \Delta u(t-1) + g_{j+1} \Delta u(t-2) + \dots + g_n \Delta u(t+j-n-1) + f_0 y(t) + f_1 y(t-1) + f_2 y(t-2) + \dots + f_m y(t-m)$$

따라서 $j=1$ 에서 $j=N$ 까지의 출력예측치는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} y(t+1) &= g_0 \Delta u(t) + f(t+1) \\ y(t+2) &= g_0 \Delta u(t+1) + g_1 \Delta u(t) + f(t+2) \\ y(t+3) &= g_0 \Delta u(t+2) + g_1 \Delta u(t+1) + g_2 \Delta u(t) + f(t+3) \\ &\vdots \\ y(t+N) &= g_0 \Delta u(t+N-1) + g_1 \Delta u(t+N-2) + \dots \\ &\quad + g_{N-1} \Delta u(t) + f(t+N) \end{aligned}$$

벡터로 표시하면 다음과 같다

$$\begin{aligned} Y &= GU + F \\ Y &= [y(t+1), y(t+2), \dots, y(t+N)]^T \\ U &= [\Delta u(t), \Delta u(t+1), \dots, \Delta u(t+N-1)]^T \\ F &= [f(t+1), f(t+2), \dots, f(t+N)]^T \end{aligned} \quad (2-7)$$

$$G = \begin{bmatrix} g_0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ g_1 & g_0 & 0 & \dots & 0 \\ g_2 & g_1 & g_0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{N-1} & g_{N-2} & \dots & \dots & g_0 \end{bmatrix}$$

$\dim G = N \times N$

2.3 기준 궤적식의 표현

출력의 도달목표치(set point)를 w 라 하면, 현재의 출력값 $y(t)$ 로부터 w 까지의 원활한 이전을 위한 기준 궤적식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$w(t+j) = \alpha w(t+j-1) + (1-\alpha)w \quad j=1, 2, \dots \quad (2-8)$$

$(0 < \alpha < 1)$

여기에서 $w(t) = y(t)$ 이며 α 가 1에 가까울수록 현재의 출력값 $y(t)$ 로부터 w 로의 이전이 완만히 일어나는 궤적이 형성되며 α 가 0에 가까울수록 이전이 급격히 일어나는 궤적이 형성된다.

2.4 제어기 구성

출력 예측치 (2-6)과 출력이 추종해야 할 기준 궤적식 (2-8)이 구해진 상태에서 제어기가 수행해야 할 역할은 미래 출력치 $y(t+j|t)$ 를 기준 궤적식 $w(t+j)$ 에 가능한 근사하게 만들어주는 것이다. 이것은 곧 에러값 $e(t+j) = y(t+j) - w(t+j)$ 를 최소화시키는 일이며 이 목적을 위해 다음과 같은 평가지표(Performance Index)를 정의하기로 한다.

$$J(N_1, N_2) = \left\{ \sum_{j=N_1}^{N_2} [y(t+j) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{NU} \lambda(j) [\Delta u(t+j-1)]^2 \right\} \quad (2-9)$$

여기에서

- N_1 : 최소 지표범위(minimum costing horizon)
 - N_2 : 최대 지표범위(maximum costing horizon)
 - $\lambda(j)$: 제어입력 가중치 열(control-weighting sequence)
 - NU : 제어입력 지표범위(control horizon)
- $\Delta u(t+j-1) = u(t+j-1) - u(t+j-2)$

식(2-9)에서 N_1, N_2, NU 는 다음과 같은 의미를 갖는다. $j=NU$ 이후의 제어입력의 변화는 없는 것으로 가정된다. NU 는 보통 1로 선택해되나 복잡한 계통에 대해서는 불안정하거나(unstable) 부족제동된(underdamped) 극점의 수와 거의 같게 선정해야한다. 그 이유는 안정한 계통의 경우는 $NU = 1$ 로 하여도 어떤순간에 구한 제어입력으로 인해 나타나는 출력을 목표도달치(Set Point)로 가도목하기 위해 다음 샘플링 순간(Sampling Time)때 계산되는 제어입력이 바로 이전 샘플링 순간(Sampling Time)때 계산된 제어입력으로 부터 급격한 변화를 보이지 않는데 반해서, 불안정한 계통의 경우는 $NU = 1$ 로만 하면 다음 샘플링 순간(Sampling Time)때 계산되는 제어입력이 급격한 변화치를 나타낼 수 있기 때문이다. 계통입력의 지연시간(dead time)을 k 개의 샘플간격(sampling interval)과 같다고 할때 N_1 은 k 보다 커야한다. ($N_1 > k$) 그 이유는 N_1 이 k 보다 작은 경우 (2-9)식을 최소화시키기 위해 계산된 $\Delta u(t)$ 가 실제로는 아무런 영향도 미치지 못하는 $y(t+j)$, ($N_1 < j < k$)항이 존재하게 되기 때문이다. N_2 는 plant의 상승시간(rise time) 정도로 잡아준다. 그 이유는 상승시간동안 입력이 출력에 유효한 영향을 미치지 때문이다 따라서 $k < N_1$, $N_1 < N_2 = N$ (계통의 상승시간), $1 < NU$ 인 경우 (2-7)의 출력예측식에서 벡터 Y, U, F 는 (2-10)과 같이 차원이 $(N_2 - N_1) \times 1$, $NU \times 1$, $(N_2 - N_1) \times 1$ 로 바뀌며 행렬 G 는 차원이 $(N_2 - N_1) \times NU$ 인 행렬 G_1 으로 바뀐다.

$$Y = G_1 U + F$$

$$G = \begin{bmatrix} g_0 & & & & & & 0 \\ g_1 & & & & & & \\ \vdots & & & & & & \\ g_{N_1-1} & & & & & & \\ \vdots & & & & & & \\ g_{N_2-1} & g_{N_2-2} & & & & & \\ & & & & g_{N_2-NU} & & \\ & & & & & & g_0 \end{bmatrix} \rightarrow G_1$$

$$\dim G1 = (N_2 - N_1) \times NU$$

$$\begin{aligned} Y &= [y(t+N_1), \dots, y(t+N_2)]^T \\ U &= [\Delta u(t), \Delta u(t+1), \dots, \Delta u(t+NU)]^T \quad (2-10) \\ F &= [f(t+N_1), \dots, f(t+N_2)]^T \end{aligned}$$

이때 (2-9)의 평가지표는 다음과 같이 행렬과 벡터들에 의해 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} J(N_1, N_2) &= \{(Y - W)^T(Y - W) + \lambda U^T U\} \\ &= \{(G1U + F - W)^T(G1U + F - W) + \lambda U^T U\} \quad (2-11) \end{aligned}$$

(2-11)식의 J를 최소화시키는 충분치 입력벡터는 (2-12)식이다.

$$U = (G1^T G1 + \lambda I)^{-1} G1^T (W - F) \quad (2-12)$$

벡터 U의 원소중 실제 계통입력으로 가해지는 것은 첫번째 원소 $\Delta u(t)$ 로써 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta u(t) = \bar{g}^T (W - F)$$

여기서 \bar{g} 는 (2-11)식에서 나타낸 $(G1^T G1 + \lambda I)^{-1} G1^T$ 행렬의 첫번째 행이다. 최종적으로 제어입력 $u(t)$ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$u(t) = u(t-1) + \bar{g}^T (W - F) \quad (2-13)$$

3. 원자로에 대한 GPC제어기의 적용

3.1 원자로 발전소의 수학적 모델

본 논문에서 고려한 원자로 발전소는 우리나라에서 주종을 이루고 있는 가압 경수형 원자로 (PWR)을 갖는 원자로 발전소이다. 우리는 여기에서 부하변화에 대한 원자로 발전소의 핵 및 열적 부분의 거동을 조사하고 제어하고자 하기 때문에 이보다 훨씬 짧은 시정수를 갖는 터빈과 전기발전기의 동특성은 모델에서 고려하지 않았다. 따라서 부하변화는 터빈으로 전달되는 증기유량의 변화 즉 그림 1의 pGs로 간주할 수 있다. Gs(kg/h)는 최대 증기유량을 나타내며 p는 $0 \leq p \leq 1$ 로써 부하변화를 나타낸다. 이 계통에 대한 간단한 구조도는 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

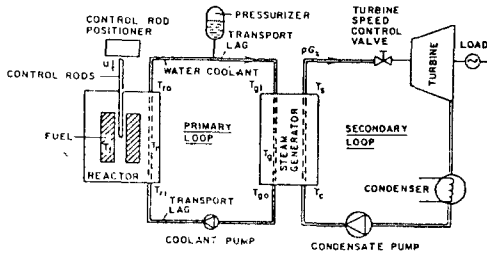


그림 1 가압 경수형 원자로 발전소의 구조

그림 1의 구조도로부터 구해낸 원자로 발전소의 동특성은 다음과 같다.

3.1.1 증기 발생기

$$\frac{d Ts(t)}{dt} = -\frac{Ts(t)}{\tau_1} + \frac{Tgi(t)}{\tau_1} - K_1 P(t) \quad (3.1)$$

$$Tgo(t) = \frac{2D}{D+2} Ts(t) - \frac{D-2}{D+2} Tgi(t) \quad (3.2)$$

여기에서,

Ts = 증기발생기 출구에서의 증기온도 [$^{\circ}C$]
 Tgi = 증기발생기 입구에서의 냉각수온도 [$^{\circ}C$]
 Tro = 증기발생기 출구에서의 냉각수온도 [$^{\circ}C$]
 P = 터빈으로의 퍼센트 증기유량
 K_1 [$^{\circ}C/s$], τ_1 [s], D = 계수들

3.1.2 원자로

A. 열 방정식

$$\frac{d Tf(t)}{dt} = -\frac{Tf(t)}{\tau_2} + \frac{Tr(t)}{\tau_2} + K_2 Pr(t) \quad (3.3)$$

$$\frac{d Tr(t)}{dt} = -\frac{Tr(t)}{\tau_3} + \frac{Tf(t)}{\tau_4} + \frac{Tri(t)}{\tau_5} \quad (3.4)$$

$$Tro(t) = 2Tr(t) - Tri(t) \quad (3.5)$$

여기에서, Tf = 원자로의 핵연료 평균온도 [$^{\circ}C$]
 Tr = 원자로의 냉각수 평균온도 [$^{\circ}C$]
 Pr = 원자로의 퍼센트 발생전력 [%]
 Tri = 원자로 입구에서의 냉각수온도 [$^{\circ}C$]
 Tro = 원자로 출구에서의 냉각수온도 [$^{\circ}C$]
 K_2 [$^{\circ}C/s$], τ_2 [s], τ_3 [s], τ_4 [s], τ_5 [s] = 계수들

B. 동특성식

$$\frac{d Pr(t)}{dt} = \frac{\sigma(t) - \beta}{\Lambda} Pr(t) + \lambda_p C(t) \quad (3.6)$$

$$\frac{d C(t)}{dt} = \frac{\beta}{\Lambda} Pr(t) - \lambda_p C(t) \quad (3.7)$$

여기에서, $\sigma(t)$ = 총반응도
 $C(t)$ = 지발중성자의 퍼센트 선행핵농도
 β = 선행핵으로부터 지발중성자의 생성비율
 Λ = 중성자의 수명시간
 λ_p = 선행핵의 평균붕괴정수
 β, Λ [s], λ_p [s^{-1}] = 계수들

C. 열전달식

$$Tgi(t) = Tro(t - T_1) \quad (3.8)$$

$$Tri(t) = Tgo(t - T_2) \quad (3.9)$$

여기에서 T_1 [s], T_2 [s] = 전달지연시간

D. 핵반응도 평형식

$$\sigma(t) = \sigma_i(t) + \sigma_o(t) \quad (3.10)$$

$$\sigma_i(t) = \alpha_f Tr(t) + \alpha_m Tr(t) \quad (3.11)$$

$$\sigma_o = \sigma - K_3 U(t) \quad (3.12)$$

여기에서,

σ_i = 내부 핵반응도 [$\Delta K/K$]
 σ_o = 외부 핵반응도 [$\Delta K/K$]
 U = 제어봉의 위치 [steps]
 α_f = 핵연료의 온도반응도 피이드계수 [$^{\circ}C$]
 α_m = 냉각수의 온도반응도 피이드계수 [$^{\circ}C$]
 σ [$\Delta K/K$], K [$\Delta K/K \text{ step}^{-1}$] = 계수들

3.2 원자로 발전소의 제어 요구사항

이 원자로 계통의 출력은 원자로 냉각수 평균온도 Tr 이며 계통에 들어오는 주요 외란으로서 부하변동으로써 본 모델에서는 터빈으로 방출되는 증기유량의

백분율 P로 나타냈다. 증기유량이 변하게 되면 이에 따라 냉각수 평균온도 Tr이 변하게 된다. 만일 폐루우프 제어를 하지 않을 경우 Tr이 크게 변동하게 되며 이 결과 핵 연료 온도 Tf와 증기온도 Ts가 안정상 규정해 놓은 한계치를 넘어서 상승하게 되며, 이에따라 열적응력으로 관련기기들이 파손되어 계통의 운전정지는 물론 안정상 문제점이 발생하게 된다. 원자로 격납용기의 강한 열적응력을 피하기위해서는 온도 Tr을 일정하게 고정시키는 것이 바람직하다. 이렇게되면 냉각수 온도계수 α_m 에 의한 반응도 변화가 최소가 되어 제어봉의 변화, 즉 제어동작도 최소가 되는 장점이 있다 그러나 Tr을 고정시키면, 부하변화뿐만아니라 계통의 시동및 정지중에 2차루우프의 압력과 온도가 심하게 변화하는 문제점이 야기된다. 반대로 2차 루우프의 증기온도와 터어빈 입구의 입력을 일정하게하면, 부하변동에 따라 원자로의 냉각수 평균온도가 변화하게 된다. 이렇게될 경우 냉각수의 온도계수 α_m 때문에 반응도 평형의 유지를 위한 큰 제어동작이 필요하게 된다. 실제 계통에서는 이러한 상반된 문제점을 해결하기 위해 Tr을 부하변동에 비례하는 값을 갖도록하는 방법을 사용하고 있다.

제어입력으로는 그림 1에서 제어봉의 삽입위치로 선정하였다. 제어봉은 중성자를 흡수할 수 있는 물질로 되어있다. 부하증가시에는 핵 연료온도와 냉각수 평균온도가 떨어지게 되며 온도계수들의 부의 피이드백 효과(negative feedback effect)로 반응도 평형이 깨진다. 이를 보상하기 위해서 제어봉을 인출하여 감소한 반응도를 보상해야하며, 반대로 부하감소시에는 제어봉을 더 삽입하여 증가된 반응도를 떨어뜨려 주어야 한다.

3.3 제어기 설계

본 연구에서 취급하는 원자로 계통은 3.1절에서 기술한것처럼 5차의 비선형 미분방정식과 1개의 대수 방정식, 그리고 2개의 지연요소를 갖는 복잡한 계통이다. 따라서 제어기 구성을 간단화하기 위해서는 비선형의 복잡한 원자로 계통을 저차의 선형계통으로 근사화 시킬 필요가 있다. 그 방법으로 온전점(Y_0, U_0, V_0)을 중심으로한 원자로 플랜트의 중분차(=편차) 입출력에 대한 근사화된 2차의 선형모델을 다음과 같이 선정한다.

$$A(q^{-1})y_p(k) = B(q^{-1})u_p(k-1) + D(q^{-1})v_p(k-2) + \xi(k)/\Delta \quad (3-13)$$

여기에서 $A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2}$
 $B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1}$
 $D(q^{-1}) = d_0 + d_1q^{-1}$
 $\xi(k)/\Delta$: 상관관계가 없는 평균 0, 표준편차 0.1인 백색잡음

$u_p(k) = U(k) - U_0 =$ 제어봉 위치편차
 $y_p(k) = Y(k) - Y_0 =$ 원자로 냉각수 평균온도 편차
 $v_p(k) = V(k) - V_0 =$ 터어빈으로 방출되는 증기유량의 백분율 편차

이와같이 선정된 선형모델에 대해 제어목적은 $y_p(k)$ 가 외란 $v_p(k)$ 에도 불구하고 원하는 추종목표치(set point) w 를 추종하도록 편차 제어입력 $u_p(k)$ 를 정하는 것이다. w 는 3.2절에서 설명한 바와 같이 외란 $v_p(k)$ 에 비례하는 값($w=16.25v_p(k)$)이다. 모델 (3-13)이 실제 원자로 계통의 동특성을 충분히 잘 대표할 수 있도록 다음과 같이 모델 (3-13)의 파라미터들을 실시간(on-line)으로 추정한다.

즉, $A(q^{-1})$, $B(q^{-1})$, $D(q^{-1})$ 다항식들의 계수를 다음과 같이 Recursive Least Squares 알고리즘을 적용하여 추정한다. (3-13)으로부터

$$\hat{y}_p(k) = -a_1y_p(k-1) - a_2y_p(k-2) + b_0u_p(k-1) + b_1u_p(k-2) + d_0v_p(k-2) + v_p(k-3) = \phi^T \theta \quad (3-14)$$

$$\text{여기에서 } \phi^T = [y_p(k-1), y_p(k-2), u_p(k-1), u_p(k-2), v_p(k-2), v_p(k-3)] \\ \theta^T = [-a_1, -a_2, b_0, b_1, d_0, d_1]$$

(3-14)에서 정의된 ϕ^T 데이터 값을 (3-15)와 같은 Recursive Least Squares 알고리즘에 적용하여 매 샘플링 순간마다 $\hat{\theta}^T$ 벡터를 추정한다.

$$\hat{\theta}^T(t) = \hat{\theta}^T(t-1) + K(t)(y(t) - \phi^T(t)\hat{\theta}^T(t-1)) \\ K(t) = P(t)\phi(t) \\ = P(t-1)\phi(t)(I + \phi^T(t)P(t-1)\phi(t))^{-1} \\ P(t) = P(t-1) \\ - P(t-1)\phi(t)(I + \phi^T(t)P(t-1)\phi(t))^{-1} \\ \times \phi^T(t)P(t-1) \\ = (I - K(t)\phi^T(t))P(t-1) \quad (3-15)$$

이와같이 추정된 계수 파라미터 값을 이용하여 GPC 제어입력식 (3-24)을 유도한다. 먼저 원자로 계통의 편차출력을 예측하는 식을 유도해야하는데 이때 주의할 점은 원자로계통 출력 추정시에 잡음(noise)이 섞여 들어가므로 이것을 필터링한 입출력데이터로부터 출력을 예측할 필요가 있다는 것이다. 따라서 Diophantine Identity를 $T(q^{-1})$ 다항식이 포함된 (3-16)식과 같이 선정하면 최종 편차출력 예측식은 (3-17)과 같이 되어 1/T로 필터링된 입출력데이터로부터 미래의 편차출력값들을 예측할 수 있음을 알 수 있다. (3-16)으로부터 (3-17)을 유도하는 과정은 (2-1)로부터 (2-13)을 유도하는 과정과 동일하므로 생략하기로한다.

Diophantine Identity :

$$T(q^{-1}) = E_j(q^{-1})A\Delta + q^{-j}F_j(q^{-1}) \quad (3-16)$$

$$y_p(t+j|t) = G_j' \Delta u_p(t+j-1) + \Gamma_j \Delta u_p^f(t-1) + H_j \Delta v_p^f(t+j-2) + F_j y_p^f(t) \quad (3-17)$$

$G_j'(q^{-1})$ 를 (3-17a)로 나타내면 (3-17)은 (3-17b)로 고쳐쓸 수 있다.

$$G_j'(q^{-1}) = g'_n q^{-n} + g'_{n-1} q^{-(n-1)} + \dots + g'_{j-1} q^{-(j-1)} + \dots + g'_2 q^{-2} + g'_1 q^{-1} + g'_0 \quad (3-17a)$$

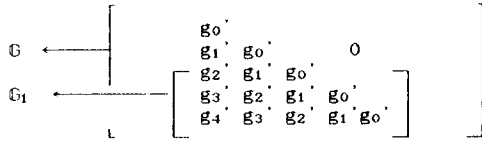
$$y_p(t+j) = g'_0 \Delta u_p(t+j-1) + g'_1 \Delta u_p(t+j-2) + \dots + g'_{j-2} \Delta u_p(t+j) + g'_{j-1} \Delta u_p(t) + g'_j \Delta u_p(t-1) + g'_{j+1} \Delta u_p(t-2) + \dots + g'_n \Delta u_p(t+j-n-1) + \Gamma_j \Delta u_p^f(t-1) + H_j \Delta v_p^f(t+j-2) + F_j y_p^f(t) = g'_0 \Delta u_p(t+j-1) + g'_1 \Delta u_p(t+j-2) + \dots + g'_{j-2} \Delta u_p(t+j) + g'_{j-1} \Delta u_p(t) + f(t+j) \quad (3-17b)$$

이 식으로부터 (3-17)에 대한 벡터형식은 (3-19)와 같다.

$$Y = GU + F \quad (3-19)$$

(3-19)식의 Y , U , F 는 $N_1 = 3$, $N_2 = 5$, $NU = 3$ 으로 정하면(3-20)과 같이 정의되며 G 는 G_1 로 바뀐다.

$$Y = [y_p(t+3), y_p(t+4), y_p(t+5)] \\ U = [\Delta u_p(t), \Delta u_p(t+1), \Delta u_p(t+2)]^T \\ F = [f(t+3), f(t+4), f(t+5)]^T \quad (3-20)$$



한편 추종목표치(set point) w 를 증분치 부하변화에 비례하는 값($w=16.25v_p(k)$)으로 정하면 증분치 계통출력 $y_p(t+j)$ 가 추종해야할 기준궤적은 다음과 같이 결정된다.

$$w(t+j) = \alpha w(t+j-1) + (1-\alpha)w \quad (3-21)$$

여기에서 $w = 16.25v_p(k)$, $j=1,2,3,4,5$ 벡터형식으로 써보면 다음과 같다.

$$W = [w(t+3), w(t+4), w(t+5)]^T$$

편차출력예측벡터 Y 와 기준궤적벡터 W 가 정해진 상태에서 제어가 수행해야할 역할은 Y 와 W 사이의 에러를 최소화시키는 것이며 이를위해 (3-22)과 같은 평가지표를 선정하고 이 평가지표값 J 를 최소화시키는 편차입력벡터 U 를 구한다.

평가지표는 (3-22)와 같다..

$$J = \{ (Y - W)^T (Y - W) + \lambda U^T U \} = \{ (GU + F - W)^T (GU + F - W) + \lambda U^T U \} \quad (3-22)$$

(3-22)의 J 를 최소화시키는 편차제어입력 벡터는 다음과 같다.

$$U = (G_1^T G_1 + \lambda I)^{-1} G_1^T (W - F) \quad (3-23)$$

U 의 첫번째 원소 $\Delta u_p(t)$ 를 사용하여 t 순간의 편차제어입력 $u_p(t)$ 는 (3-24)로 구해진다.

$$u_p(t) = u_p(t-1) + \Delta u_p(t) \quad (3-24)$$

실제 계통에 가해지는 제어입력은 $u_p(t)$ 를 운전점 U_0 에 더해준 값 $U(t)$ 이다.

$$U(t) = U_0 + \Delta u_p(t) \quad (3-25)$$

참고로 전체계통에 대한 블록선도를 그려보면 그림 2와 같다.

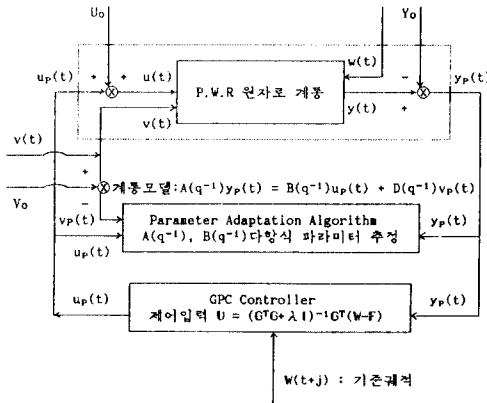


그림 2 전체계통에 대한 블록선도

3.4 시뮬레이션 결과 및 검토

본 시뮬레이션에서는 3.1절의 수학적식들에 의해 원자력발전소 계통을 구성하고 3.3절의 제어기 구성식들을 사용하여 제어기 부분을 설계하였다. 파라미터 추정식 (3-15)에서 행렬 $P(t)$ 와 파라미터벡터 $\theta(t)$ 의 초기치는 다음과 같은 값을 사용하였다.

$$\text{diag } P(0) = 100 \\ \theta(0) = [1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0]^T$$

추종목표치 (set point)에 대한 기준궤적식 (3-25)에서 α 값은 0.1로 하였다. 평가지표식 (3-26)에 필요한 N_1, N_2, NU, λ 값 설정은 다음과 같이 하였다.

$$N_1 = 3, \quad N_2 = 5, \quad NU = 3, \quad \lambda = 0$$

그림 3은 부하변동이 있을때 원자로를 제어하지 않을 경우의 계통출력(냉각수의 평균온도, Tr)을 나타낸 다. 이 그림에서보면 계통의 출력이 부하변동에따른 기준궤적값을 추종하지 못함을 볼 수 있다. 그림 4는 (3-25)식에 의해 구성된 GPC제어기로 제어를 한 결과이며 계통의 출력이 기준궤적을 잘 추종함을 알 수 있다. 그림 5는 이때의 제어입력(제어봉의 위치)이며 출력에 섞여들어가는 백색잡음(평균치 0, 공분산 0.1)때문에 약간 예민한 궤적을 그리고 있음을 알 수 있다.) 그림 6, 그림 7, 은 각각, $A(q^{-1}), B(q^{-1})$ 다항식의 추정된 파라미터들을 나타낸다. 또 이 시뮬레이션에서는 계통입력이 제어봉 서보기구에서의 오동작(상승시간의 연장)으로 인하여 $k = 100$ 인 시점에서 $u(k)$ 로부터 $u(k-1)$ 로 1스텝 지연되어 계통에 가해지는 것으로 하였는데 이와같은 입력지연시간변화에도 불구하고 제어 동작이 성공적으로 이루어지는 것을 알 수 있다.

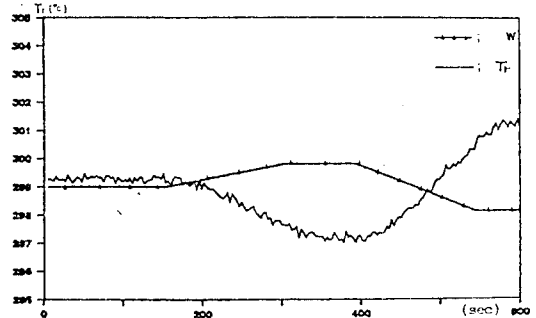


그림 3 제어를 하지 않은 경우에 나타나는 원자로 냉각수 온도

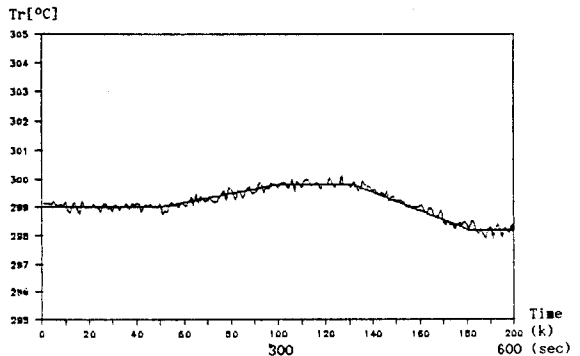


그림 4 GPC 제어기에 의하여 제어된 원자로 냉각수 온도와 추종기준치

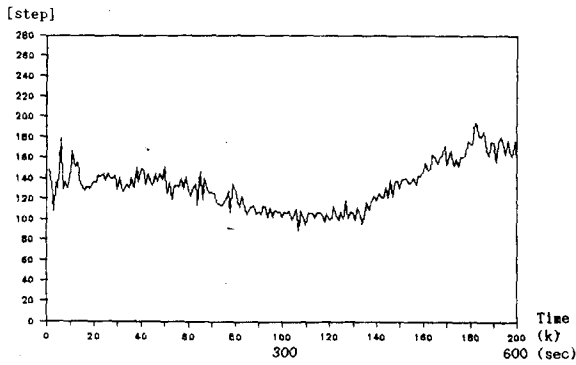


그림 5 그림 4에 대응되는 제어입력(제어봉 위치)

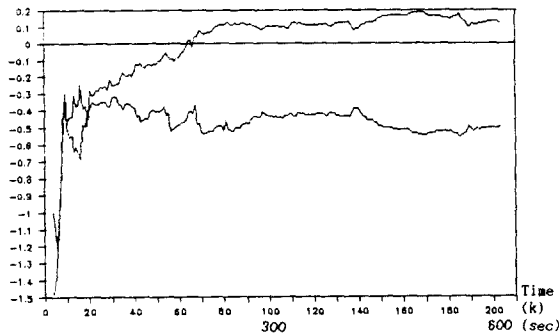


그림 6 계통모델 파라미터 (a1, a2)

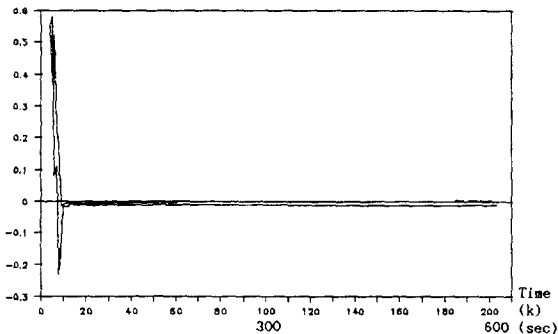


그림 7 계통모델 파라미터 (b0, b1)

4. 결 론

정격출력 400MWe인 가압경수형 원자로의 출력제어문제를 일반화된 예측제어기(Generalized Predictive Controller)를 사용한 알고리즘으로 시뮬레이션해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 제시된 GPC 제어 알고리즘은 원자력발전소 계통의 입력지연시간값 가정이 다소 오차가 있어도 원하는 장점이 있다.
- 2) 계통입력의 시간지연이 가변인 경우 계통모델로 선정한 CARIMA 표현식에서 $A(q^{-1})$, $B(q^{-1})$ 다항식의 차수를 적절히 늘려서 선택할 필요가 있었다. ($B(q^{-1})$ 다항식의 경우 플랜트 입력의 시간지연이 늘어나는 만큼 차수를 증가된 값으로 선택한다.)
- 3) GPC 제어기는 N_1 , N_2 , NU , λ 값을 얼마로 정하는가에 따라 동작특성이 매우 달라지므로 이 값들의 선정에 주의하여야 한다.

5. 참고 문헌

- [1] G.T. Bereznoi and N.K. Shinha, " Adaptive Control of Nuclear Reactors Using a Digital Computer ", IEEE Nucl.Sci., Vol.NS-18, No.4, pp.387-397, 1971.
- [2] R.L. Moore and E.C. Schweppe, " Model Identification for Adaptive Control of Nuclear Power Plants ", Automatica, Vol.9, pp.527-536, 1973.
- [3] T. Fukuda, " Application of Stable Adaptive Schemes to Nuclear Reactor Systems ", J. Nucl.Sci. and Tech. Vol.15 No.5, pp.474-483, 1979, Vol.16, No.8, pp.553-562, 1979, Vol 16, No.9, pp.637-646, 1979.
- [4] E. Irving and H. Dang Van Mein, " Discrete - Time Model Reference Multivariable Adaptive Control Applications to Electrical Power Plants ", IFAC Control Sci.Tech. pp.3143-3157, Kyoto, Japan, 1981.
- [5] A.Y. Allidina, F.M. Hughes and C., "The Self-Tuning Control of a Nuclear Reactor ", IEEE Conf. Publ.194, pp.118-122, 1981.
- [6] G.T. Park and G.H. Miley, " Application of Adaptive Control to a Nuclear Power Plant ", Nucl.Sci & Eng., 94, pp.145-156, 1986.
- [7] D.W. Clarke and P.J. Gavthrop, " Self - Tuning Controller ", Proc. IEE, Vol.122, No.9, 1975.
- [8] K.J. Astrom and B. Wittenmark, " On Self-Tuning Regulators ", Automatica, Vol.9, pp.185-199, 1973.
- [9] K.J. Åström, U. Borisson, L.Ljung and B. Wittenmark, " Theory and Applications of Self-Tuning Regulators ", Automatica, Vol.13, pp. 457-476, 1977.
- [10] D.W. Clarke, " Self-Tuning Control of Nonminimum-phase System ", Automatica, Vol.20, No.5, pp.501-517, 1984.
- [11] DaeGyu Byun and WookHyun Kwon, " Predictive Control: A Survey and Some new stability results ", '87 KACC, pp.734-740, 1987.
- [12] C.R. Cutler, " Dynamic Matrix Control of Imbalanced Systems ", ISA Trans., Vol.21, No.1, pp.1-6, 1982.
- [13] R. Rouhani and R.K. Mehra, " Model Algorithmic Control (MAC) : Basic Theoretical Properties ", Automatica, Vol.18, No.4, pp.401- 414, 1982.
- [14] B.E. Ydstie, L.S. Kershenbaum and R.W.H. Sargent, " Theory and Application of an Extended Horizon Self-Tuning Controller " , AIChE Journal, Vol.31, No.11, pp.1771-1780, 1985.
- [15] D.W. Clarke, C. Mohtadi and P.S. Tuffs, " Generalized Predictive Control-Part I. The Basic Algorithm ", Automatica, Vol.23, No.2, pp.137-143, 1987.
- [16] D.W. Clarke, C. Mohtadi and P.S. Tuffs, " Generalized Predictive Control-Part II. Extensions and Interpretations", Automatica, Vol.23, No.2, pp.149-160, 1987.
- [17] D.W. Clarke and C. Mohtadi, " Properties of Generalized Predictive Control "
- [18] C. Mohtadi and D.W. Clarke, " Generalized Predictive Control, LQ, or Pole-placement ", K.W. Lim and K.V. Ling, " Generalized Predictive Control of a Heat Exchanger ", IEEE Control System Magazine, pp.9-12, 1989.
- [20] V. Peterka, " Predictor-based Self-Tuning Control ", Automatica, Vol.20, No.1, pp.39-50, 1984.