

증기발생기 수위제어를 위한 적응일반형예측제어 설계

o 김 창 회

한국원자력연구소 계속제어개발실

Design of Adaptive GPC with Feedforward for Steam Generator

o Kim Chang Hwoi

Dept. of Instrumentation and Control, KAERI

ABSTRACT

This paper proposes an adaptive generalized predictive control with feedforward algorithm for steam generator level control in nuclear power plant. The proposed algorithm is shown that the parameters of N-step ahead predictors can be obtained using the parameters of one-step ahead predictor which is derived from plant model with feedforward. Using this property, the proposed scheme is an adaptive algorithm which consists of GPC method and the recursive least squares algorithm for identifying the parameters of one-step ahead predictor.

Also, computer simulations are performed to evaluate the performance of proposed algorithm using a mathematical model of PWR steam generator. Simulation results show good performances for load variation. And the proposed algorithm shows better responses than PI controller does.

1. 서 론

최근 예측제어에 관한 많은 연구가 여러분야에서 진행되고 있다. 그중에서 1987년 Clarke등에 의해 제안된 단일 입출력 시스템에 대한 일반형예측제어(GPC: Generalized Predictive Control)^{[1][2]}가 일반적으로 많이 사용되고 있다. Bitmead등^[3]은 일반형예측제어와 다른 자기동조제어기간의 연관성을 조사하였고, Montadi^[4] 등은 다변수계통에 적용가능한 형태로 확장하였다. 그리고 CAMACHO등^[5]은 일차계통으로 표현된 모델에 대해 선형보간알고리즘을 이용하여 제어기의 계수를 미리 계산하는 방법을 제시하였다.

본 논문에서는 전방경로(feedforward)성분을 고려한 적응 일반형예측제어(AGPCF: Adaptive Generalized Predictive Control with Feedforward)를 제안하고 이를 원자력발전소 증기발생기 수위제어에 적용하였다. 제안된 제어기는 Clarke 등이 제안한 일반형예측제어에 전방경로성분을 고려하여 전방 경로신호에 의한 출력변화를 보상하는 방법을 사용하고 있다. 그리고 시간이나 운전조건에 따라 변하는 계통에 대해서도 안정된 제어성능을 나타내도록 하기 위해 일단 출력예측기(one step ahead predictor)의 계수를 실시간으로 추정하는 방법을 사용한다. 이 제어기는 다른 적응형제어기에 비해 추정해야 할 계수가 적고, 실시간으로 변하는 계통에 적용가능하며, 특히 최대지표범위가 1인 경우에 추정된 계수로부터 부가적인 계산 없이 제어입력을 구할 수 있다는 장점을 가진다.

이 제어기의 성능평가를 위한 모델실험은 전달함수로 표현된 증기발생기모델^[6]을 이용하여 비례-적분제어기와 성능을 비교하였다.

2. 전방경로성분을 고려한 적응 일반형예측제어 (AGPCF: Adaptive GPC with Feedforward)

산업계등에서 사용되는 많은 계통들은 측정가능한 전방경로성분이 존재한다. 이들은 계통출력에 직접 더해지는 잡음의 형태로 간주할 수 있다. 제어기 설계시 이들에 대한 영향을 고려한다면 보다 정확한 제어를 기대할 수 있어 출력의 변동을 줄일 수 있다. 원전의 증기발생기는 전방경로성분 즉, 증기의 변화가 출력에 영향을 미치는 시스템이다. AGPCF는 이러한 특성을 가지는 플랜트에 사용할 수 있도록 설계되었다.

2.1 AGPCF 알고리즘

AGPCF 알고리즘을 유도하기 위해 전방경로성분을 가지는 단일 입출력 선형계통을 다음과 같은 이산형 CARIMA 모델로 표현하자.

$$A(q^{-1})y(t) = q^{-d_1}B(q^{-1})u(t) + q^{-d_2}D(q^{-1})v(t) + C(q^{-1})\xi(t)/\Delta \quad (2-1)$$

여기서,

$$\begin{aligned} A(q^{-1}) &= 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_nq^{-n} \\ B(q^{-1}) &= b_0 + b_1q^{-1} + \dots + b_mq^{-m} \\ C(q^{-1}) &= 1 + c_1q^{-1} + \dots + c_kq^{-k} \\ D(q^{-1}) &= d_0 + d_1q^{-1} + \dots + d_lq^{-l} \\ \xi(t) &: \text{상관관계가 없는 랜덤 시이퀀스} \\ \Delta &: 1 - q^{-1} \\ u(t) &: \text{제어입력} \\ v(t) &: \text{측정가능한 전방경로 신호} \\ d_1, d_2 &: \text{가정된 시간지연값} \end{aligned}$$

이고 q^{-1} 는 후항이동연산자를 나타낸다. 식(2-1)을 j 단 앞선 출력예측기로 표현하기 위해 diophantine항등식을 도입하자.

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

여기서

$$\begin{aligned} E_j(q^{-1}) &= e_0 + e_1q^{-1} + \dots + e_{j-1}q^{-(j-1)} \\ F_j(q^{-1}) &= f_{j0} + f_{j1}q^{-1} + \dots + f_{j\infty}q^{-\infty} \end{aligned}$$

이산형 CARIMA 모델과 diophantine항등식으로부터 j 단 출력예측기(J -step ahead predictor)를 미래의 제어입력 및 전방 경로 신호에 해당하는 항과 과거의 제어입력 및 전방경로신호에 해당하는 항으로 나누어 표현하면(단, 미래잡음 제외)

$$\begin{aligned} y(t+j;t) &= G_j(q^{-1})\Delta u(t+j-1) + H_j(q^{-1})\Delta v(t+j-1) \\ &+ P_j(q^{-1})\Delta u(t-1) + S_j(q^{-1})\Delta v(t-1) \\ &+ F_j(q^{-1})y(t) \end{aligned} \quad (2-3)$$

여기서

$$\begin{aligned} G_j(q^{-1}) &= g_0 + g_1q^{-1} + g_2q^{-2} + \dots + g_{j-1}q^{-(j-1)} \\ P_j(q^{-1}) &= p_{j0} + p_{j1}q^{-1} + \dots + p_{j\infty}q^{-\infty} \\ H_j(q^{-1}) &= h_0 + h_1q^{-1} + h_2q^{-2} + \dots + h_{j-1}q^{-(j-1)} \\ S_j(q^{-1}) &= s_{j0} + s_{j1}q^{-1} + \dots + s_{j\infty}q^{-\infty} \\ F_j(q^{-1}) &= f_{j0} + f_{j1}q^{-1} + \dots + f_{j\infty}q^{-\infty} \end{aligned}$$

과 같다. 식(2-3)에서 j 를 1에서 N_2 까지 확장하여 벡터로 출력예측기들을 표현하면 다음과 같다.

$$\bar{Y} = G\bar{U} + H\bar{V} + P\bar{U} + S\bar{V} + F\bar{Y} \quad (2-4)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \bar{Y} &= [y(t+1;t) \ y(t+2;t) \ \dots \ y(t+N_2;t)]^T \\ \bar{U} &= [\Delta u(t) \ \Delta u(t+1) \ \dots \ \Delta u(t+N_1-1)]^T \\ \bar{U} &= [\Delta u(t-1) \ \Delta u(t-2) \ \dots \ \Delta u(t-m-1)]^T \\ \bar{Y} &= [y(t) \ y(t-1) \ \dots \ y(t-n)]^T \\ \bar{V} &= [\Delta v(t-1) \ \Delta v(t-2) \ \dots \ \Delta v(t-d-1)]^T \\ \bar{V} &= [\Delta v(t) \ \Delta v(t+1) \ \dots \ \Delta v(t+N_2-1)]^T \end{aligned}$$

단, $NU < j$ 이면 $\Delta u(t+j-1) = 0$

$$j \geq 2 \text{ 이면 } \Delta v(t+j-1) = 0$$

이고 G, P, H, S 그리고 F는 어떤 행렬이다.
최적의 제어입력을 구하기 위한 가격함수는 다음과 같다.

$$J = \left\{ \sum_{j=N_1}^{N_2} [y(t+j;t) - W(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{NU} \lambda(j) [\Delta u(t+j-1)]^2 \right\} \quad (2-5)$$

여기서 N2는 최대지표범위(maximum costing horizon), N1은 최소지표범위(minimum costing horizon), NU는 제어지표범위(control horizon), λ(j)는 제어가중치(control weighting sequence) 그리고 W(t+j)는 안다고 가정할 미래의 설정치다.
식(2-4)로 표현된 출력예측기 벡터와 주어진 설정치를 이용하여 가격함수를 최소화하는 최적의 제어수열을 모두 구하여 실제 플랜트에 사용될 제어입력으로 표현하면

$$\bar{U} = (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T (W - P U - H V - S V - F Y) \quad (2-6)$$

$$u(t) = u(t-1) + g^T (W - P U - H V - S V - F Y) \quad (2-7)$$

여기서,

$$g^T = [1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0] (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T$$

이다. 식(2-7)로 표현된 제어입력식이 시간에 따라 변하는 계통에 적용되기 위해서는 실시간으로 G, P, H, S, F행렬이 계산되어야 한다. 먼저 Diophantine 항등식을 이용하여 이들 행렬을 구해보자. 그러면 이들이 어떤 규칙성을 가지고 있다는 사실을 알 수 있다.

2.1.1 F 다항식의 순환해

E_j(q⁻¹)와 F_j(q⁻¹)다항식의 계수들은 주어진 예측구간 j와 A(q⁻¹) 다항식에 의해 유일하게 결정되므로 Diophantine 항등식에 대해 순환기법을 이용하여 이들을 구해보자.
먼저 식(2-2)의 Diophantine 항등식을 예측구간 j+1로 확장하면

$$1 = E_{j+1}(q^{-1})A(q^{-1})\Delta + q^{-j-1}F_{j+1}(q^{-1}) \quad (2-8)$$

로 주어지고 식(2-2)에서 식(2-8)를 빼면

$$\begin{aligned} 0 &= \{E_{j+1}(q^{-1}) - E_j(q^{-1})\}A(q^{-1})\Delta \\ &\quad + q^{-j}\{q^{-1}F_{j+1}(q^{-1}) - F_j(q^{-1})\} \\ 0 &= e_{j+1}A(q^{-1})\Delta + q^{-j}\{q^{-1}F_{j+1}(q^{-1}) - F_j(q^{-1})\} \\ q^{-1}F_{j+1}(q^{-1}) &= F_j(q^{-1}) - e_{j+1}A(q^{-1})\Delta \end{aligned} \quad (2-9)$$

와 같다. 이제 식(2-2)와 식(2-9)를 이용하여 j를 1에서 N2-1까지 확장시켜 F행렬을 만들면 다음과 같이 구성된다.
이때 F행렬은 (n+1)×N2 차원을 가진다.

$$F = \begin{bmatrix} 1-a_1 & a_1-a_2 & \dots & a_n \\ f_{11}+(1-a_1)e_1 & f_{12}+(a_1-a_2)e_1 & \dots & a_n e_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{N2-11}+(1-a_1)e_{N2-1} & f_{N2-12}+(a_1-a_2)e_{N2-1} & \dots & a_n e_{N2-1} \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

여기서,

$$\begin{aligned} e_0 &= 1, & e_1 &= f_{10}, & e_2 &= f_{20}, \\ e_3 &= f_{30}, & \dots & & e_{N2-1} &= f_{N2-10} \end{aligned}$$

2.1.2 G, H, P, S 다항식의 순환해

j단 출력예측기 식(2-3)에서 j를 1에서 N2까지 확장하여 미래 제어입력과 미래 전방경로신호의 요소로 표현되는 G, H 행렬 그리고 과거 제어입력과 과거 전방경로신호의 요소로 표현되는 P, S 행렬을 구해보면 다음과 같다.
이때 G는 (N2×NU)차원을 H는 (N2×1), P는 (N2×m) 그리고 S는 (N2×d)차원을 가진다.

$$G = \begin{bmatrix} e_0 b_0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ e_0 b_1 + e_1 b_0 & e_0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ e_0 b_2 + e_1 b_1 + e_0 b_0 & e_0 b_1 + e_1 b_0 & e_0 b_0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & e_0 b_0 \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

$$H = \begin{bmatrix} e_0 d_0 \\ e_0 d_1 + e_1 d_0 \\ e_0 d_2 + e_1 d_1 + e_0 d_0 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

$$P = \begin{bmatrix} e_0 b_1 & e_0 b_2 & \dots & e_0 b_m \\ e_0 b_2 + e_1 b_1 & e_0 b_3 + e_1 b_2 & \dots & e_1 b_m \\ e_0 b_3 + e_1 b_2 + e_2 b_1 & e_0 b_4 + e_1 b_3 + e_2 b_2 & \dots & e_2 b_m \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

$$S = \begin{bmatrix} e_0 d_1 & e_0 d_2 & \dots & e_0 d_d \\ e_0 d_2 + e_1 d_1 & e_0 d_3 + e_1 d_2 & \dots & e_1 d_d \\ e_0 d_3 + e_1 d_2 + e_2 d_1 & e_0 d_4 + e_1 d_3 + e_2 d_2 & \dots & e_2 d_d \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (2-14)$$

지금까지 구한 G, H, P, S 그리고 F행렬의 구성을 살펴보면 이들 행렬의 첫번째 열을 안다면 쉽게 최대지표범위 크기의 행렬로 확장시킬 수 있음을 알 수 있다. 계통의 계수를 모르는 경우 매 샘플링순간마다 추정기법을 이용하여 이들 행렬의 첫번째 열을 추정하는 AGPCF 구조를 만들어 보자.

2.1.3 AGPCF 구조

일단 출력예측기의 계수에 해당되는 G₁(q⁻¹), H₁(q⁻¹), P₁(q⁻¹), S₁(q⁻¹) 그리고 F₁(q⁻¹) 다항식의 계수를 추정하는 방법을 생각해 보자.

일단 출력예측기의 계수벡터를 θ_p로 정의하면

$$\theta_p = [g_0, h_0, p_{10}, \dots, p_{1n-1}, s_{10}, \dots, s_{1d-1}, f_{10}, \dots, f_{1n}] \quad (2-15)$$

이고, 아래의 회귀형으로 표현할 수 있다.

$$y(t+1;t) = \phi_p^T(t) \theta_p \quad (2-16)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \phi_p(t)^T &= [\Delta u(t), \Delta u(t-1) \dots \Delta u(t-m), \Delta v(t), \Delta v(t-1) \\ &\quad \dots \Delta v(t-d), y(t) \dots y(t-n)] \end{aligned}$$

식(2-16)의 계수를 추정하기 위해 순환형 최소자승알고리즘을 사용하여 다음과 같은 AGPCF를 구성하자.

① 1 단계: 일단 출력예측기의 계수 추정

$$\hat{\theta}_p(t) = \hat{\theta}_p(t-1) + \left\{ \frac{P(t-2)\phi_p(t-1)}{1 + \phi_p^T(t-1)P(t-2)\phi_p(t-1)} \times [y(t) - \phi_p^T(t-1)\hat{\theta}_p(t-1)] \right\} \quad (2-17)$$

$$P(t-1) = P(t-2) - \frac{P(t-2)\phi_p(t-1)\phi_p^T(t-1)P(t-2)}{1 + \phi_p^T(t-1)P(t-2)\phi_p(t-1)}$$

② 2 단계: G, H, P, S 그리고 F행렬 구성

③ 3 단계: 제어입력벡터 계산

④ 4 단계: 실제 계통에 적용될 제어입력 계산

위의 알고리즘은 전방경로성분을 가지는 계통에 대해 추정기법을 이용하여 일단 출력예측기의 계수들을 추정하여 실제 계통에 적용될 제어입력을 구하는 방법을 사용하고 있다. 그리고 제안된 방법은 최대지표범위가 1인 특별한 경우 부가적인 계산없이 제어입력을 구할 수 있는 직접적용형이 된다.

3. AGPCF의 안정성 분석

제안된 AGPCF에 대한 안정특성을 조사하기 위해 먼저 일단 출력예측기의 계수추정을 RLS 알고리즘을 이용한다고 생각해 보자. 일단 출력예측기는 계수 θ_p에 대한 선형함수이고, 아래 식(3-1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{y}(t+1) = \phi_p(t)^T \theta_p \quad (3-1)$$

식(3-1)에서 \hat{y} 와 계통의 출력 y가 같아지게 하는 어떤 값 θ_p (혹은 θ₀)가 모든 시간 t에서 존재한다고 가정하면

$$\hat{y}(t+1, \theta_0) = \phi_p(t)^T \theta_0 = y(t+1) \quad (3-2)$$

와 같이 표현되고, 위의 식(3-2)에 대해 RLS 알고리즘 및 causality 특성을 이용하여 일단 출력예측기를 다시 표현하면

$$\hat{y}(t) = \phi_p(t-1)^T \hat{\theta}(t-1) \quad (3-3)$$

과 같다. 위의 출력예측기에 대한 특성은 아래의 보조정리 1에 의해 설명된다.

보조정리 1. 만약 y(t)의 수열이 식(3-2)를 만족하고,

- i) φ_p(·)의 차수가 시스템 차수에 맞게 선택되고,
- ii) {y(t)} 및 {Au(t)}의 크기가 제한되면, 식(3-3)은 다음과 같은 수렴특성을 가진다.

$$\lim_{N_2 \rightarrow \infty} \sum_{t=1}^{N_2} (y(t) - \hat{y}(t))^2 < \infty \quad (3-4)$$

그리고

$$\lim_{N2 \rightarrow \infty} (y(t) - \hat{y}(t))^2 = 0 \quad (3-5)$$

위의 보조정리 1에 대한 증명은 참고문헌 [6]을 참조하면 된다. 추정된 일단 출력에측기의 계수를 이용하여 최대지표 범위의 G, H, P, S, F행렬을 구성하여 만들어지는 AGPCF의 안정특성은 예측구간 N2가 유한할 경우 N2, N1, λ를 어떻게 선택하는나에 따라 달라지게 된다. 이들에 대한 결과는 참고문헌 [7]에 언급되어있으므로 여기에서는 증명없이 간단히 기술한다.

정리 1.

- 만약, i) N2 = NU;
 ii) an ≠ 0;
 iii) λ(t+i) = λ > 0, for i = 0, . . . , N2
 iv) N2 ≥ n 이면

폐루프시스템 식(2-1), 식(2-7)은 점근적으로 안정하다.

정리 2.

- 만약, i) N2 - NU가 유한하고;
 ii) an ≠ 0;
 iii) λ(t+i) = λ > 0, for i = 0, . . . , N2
 iv) N2 ≥ n 이면

폐루프시스템 식(2-1), 식(2-7)은 점근적으로 안정하다.

4. 모의실험결과 및 토의

4.1 증기발생기 모델

본 모의실험은 Irving등[6]이 제안한 간략화된 수학적 모델을 이용하여 제안된 제어기의 성능을 실험하였다. Irving등은 가압경수로형의 증기발생기에 대해 어떤 원자로 출력에서 증기유량이나 급수유량의 계단변화에 따른 증기발생기 수위의 응답특성을 이용하여 급수유량과 증기유량 그리고 수위에 대한 전달함수로 증기발생기를 모델링하였다. Irving등이 표현한 모델을 살펴보면 질량효과에 따른 질량유량항목, 에너지효과에 따른 열적항목 그리고 모멘텀효과에 따른 기계적 진동항목으로 나누어 표현되어 있다.

$$Y(S) = \left(\frac{G_1}{S} - \frac{G_2}{1 + \tau_2 S} \right) [U_1(S) - U_2(S)] + \left(\frac{G_3 S}{2\tau^2 + 4\tau^2 T^2 + 2\tau^{-1} S + S^2} \right) U_3(S) \quad (4-1)$$

여기서,

- U₁(S) : 급수유량 (Kg/sec)
- U₂(S) : 증기유량 (Kg/sec)
- S : Laplace 변수
- τ₂ : 역동특성을 위한 포화시간 상수
- τ : 감쇄상수
- T : 진동주기
- G₁ / S : 질량효과
- G₂ / (1 + τ₂S) : 에너지효과
- $\frac{G_3 S}{2\tau^2 + 4\tau^2 T^2 + 2\tau^{-1} S + S^2}$: 모멘텀효과

Irving등은 위의 식에서 G₁은 부하의 변동에 따라 일정한 값으로, G₂와 τ₂는 저출력으로 갈수록 큰값으로 두어 평창과 수축현상이 저출력에서 크게 나타나도록 하였다.

본 실험에서는 샘플링시간을 0.2초로 하여 식(4-1)을 이산화시스템으로 변환하였다.

표 1은 모의실험에 사용된 모델의 계수를 보여주고 있다.

표 1. 고정출력에서 사용된 모델의 계수

증기유량 kg/sec	57.4	180.8	381.7	660	1435
출력(%)	5	15	30	50	100
G ₁	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058
G ₂	9.63	4.46	1.83	1.05	0.47
G ₃	0.181	0.226	0.310	0.215	0.105
τ	41.9	26.3	43.4	34.8	28.6
τ ₂	48.4	21.5	4.5	3.6	3.4
T	119.6	60.5	17.7	14.2	11.7

4.2 실험결과 및 검토

모의실험에서는 기존의 증기발생기 수위제어에 많이 사용되는 비례-적분(PI)제어기와 제안된 제어기에 대해 모의실험을 수행하고 그 성능을 비교하였다.

4.2.1 PI 제어기를 이용한 실험

모의실험에 사용된 디지털 비례-적분제어기는 수위와 설정치의 차를 보상하는 제어기와 증기와 급수유량의 차를 보상하는 제어기의 합으로 구성하였다.

$$\Delta u_1(kT) = K_{p1}\{E_1(kT) - E_1((k-1)T)\} + K_{i1}E_1(kT) \quad (4-2)$$

$$u_1(kT) = \Delta u_1(kT) + u_1((k-1)T) \quad (4-3)$$

$$\Delta u_2(kT) = K_{p2}\{E_2(kT) - E_2((k-1)T)\} + K_{i2}E_2(kT) \quad (4-4)$$

$$u_2(kT) = \Delta u_2(kT) + u_2((k-1)T) \quad (4-5)$$

$$u(kT) = u_1(kT) + u_2(kT) \quad (4-6)$$

여기서,

E₁(kT) = setpoint(kT) - y(kT) : 수위와 설정치의 차

E₂(kT) = U₂((k-1)T) - U₁((k-1)T) : 증기와 급수유량의 차

T : 샘플링 시간

K_{p1} = 1.5, K_{p2} = 0.5 : 비례이득 (proportional gain)

K_{i1} = 0.075, K_{i2} = 1 : 적분이득 (integral gain)

모의실험에서는 5% 출력에 대해 Ziegler-Nichols 동조 절차에 따라 비례 및 적분이득을 정하여 5%에 대한 고정출력 실험을 하였다. 그리고 5% 출력에 대한 모델계수로부터 갑자기 출력증가로 인한 증기발생기 모델이 변했을 경우의 출력변화실험을 수행하였다(그림 1, 2).

4.2.2 AGPCF를 이용한 실험

제안된 제어기를 이용한 실험에서는 설계변수를 NU=1, N2=10, N1=1 그리고 λ = 0.1로 선택하였다. 그리고 표 1의 5% 출력에 대한 모델계수를 이용한 고정출력실험과 5% 출력에 대한 모델계수로부터 갑자기 출력증가로 인한 증기발생기 모델이 변했을 경우 일단 출력에측기의 계수를 추정하여 안정된 제어성능을 나타내는데에 대한 출력변화실험을 수행하였다(그림 3, 4).

4.2.3 모의실험결과에 따른 검토

AGPCF의 성능평가를 위해 비례-적분제어기와 비교실험하였고, 모든 실험에서 증기유량에 평균이 영이고, 편차가

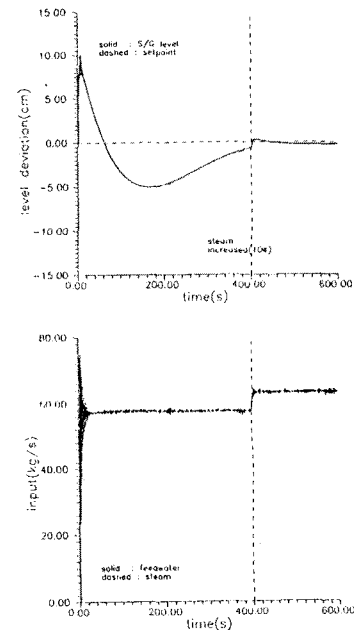


그림 1. PI 제어에 의한 수위변동(5% 출력)

0.2인 백색잡음이 존재한다고 가정하였다.

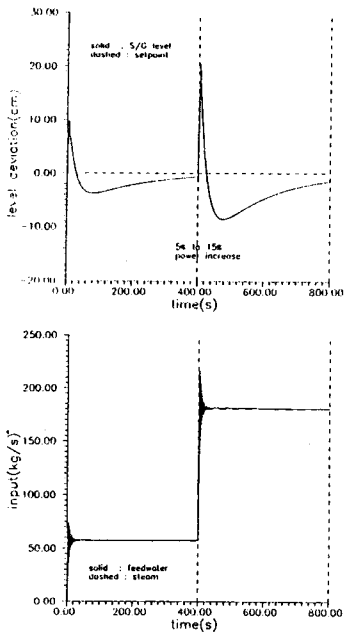


그림 2. PI 제어에 의한 수위변동(5%에서 15%로 출력변화)

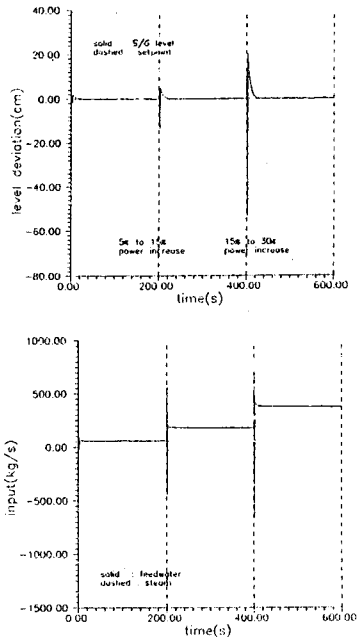


그림 4. AGPCF에 의한 수위변동(5%에서 30%로 출력변화)

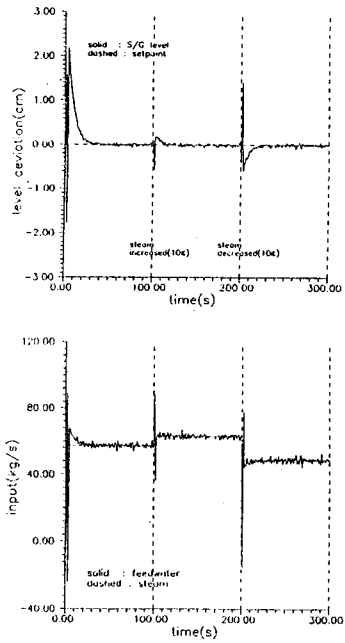


그림 3. AGPCF에 의한 수위변동(5% 출력)

먼저 고정출력에 대한 실험에서 제안된 제어기는 수위설정치로 빠른시간내에 수렴하였고, 설정치와의 차도 작게 나타났다. 또 전방경로신호의 변화 즉 증기유량의 변화가 생겼을 때 제안된 제어기는 증기발생기의 수위를 미리 예측하여 설정치와의 차를 최소화하는 제어입력을 발생시켜 빠른 시간내에 설정치에 수렴하였다. 이때 증기유량변화에 의한 수위의 수축 및 팽창현상을 감축할 수 있었다(그림 1.3).

그리고 출력변화시연을 보면 비례-적분제어기는 모델의 변화에도 불구하고 고정된 비례 및 적분이득을 사용해야 하므로 설정치와 차가 크게 나타났고, 긴 수렴시간을 가진다는 사실을 알 수 있다. 반면에 제안된 제어기는 실시간으로 일단 출력예측기의 계수를 추정하여 모델변화에도 불구하고 안정된 수렴특성을 나타낸다는 사실을 알 수 있다(그림 2.4).

지금까지 모의실험을 통해 살펴본 결과 제안된 제어기는 출력변화에 따른 모델의 계수변화에도 불구하고 계수를 정확히 추정하여 안정된 제어동작을 나타내었고, 전방경로신호의 변화에 대해서도 안정된 수렴특성을 보임을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 전방경로성분을 고려한 적응 일반형예측 제어(AGPCF)를 제안하고 이를 원자력발전소 증기발생기 수위 제어에 적용하여 비례-적분제어기와 성능을 비교하였다. 제안된 제어기는 전방경로성분을 가지는 계통에 대해 추정기법을 이용하여 일단 출력예측기의 파라미터를 실시간으로 추정한후 이를 최대치범위에 해당하는 계수들의 행렬로 확장하여 가격함수를 최소화하는 최상의 제어입력을 구하는 방법을 사용하고 있다.

이 제어기는 다른 적응제어기에 비해 추정해야 할 계수가 적고 특히, 최대치범위가 1인 경우 직접적응형이 된다는 특징도 가진다.

모의실험에서는 전달함수로 표현된 증기발생기 모델을 이용하여 제안된 제어기의 성능을 평가하였다. 모의실험결과 비례-적분제어기에 비해 짧은 시간내에 설정치에 수렴하였고, 또한 부하에 따른 증기발생기 동특성 변화에 대해서도 안정된 제어동작을 보여 비례-적분제어기보다 성능이 우수하다는 것을 알 수 있었다.

6. 참고문헌

- [1] D.W. Clarke, C. Mohtadi and P. S. Tuffs, "Generalized Predictive Control-part I. The Basic Algorithm," *Automatica*, Vol.23, No.2, PP.137-148 1987.
- [2] 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.
- [3] BITMEAD, R.P. et al., "Adaptive Optimal Control, the Thinking Man's GPC," New York : Prentice Hall, 1990.
- [4] MOHTADI, C. et al., "Frequency Response Characteristics of MIMO GPC," *Proceedings First European Control Conference(ECCI)*, Grenoble, France, Vol.2, PP.1845-1850, 1991.
- [5] E. F. Camacho and J. M. Quero, "Precomputation of Generalized Predictive Self-Turning Controllers," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, Vol.36, No.7, pp.852-859, 1991.
- [6] E. Irving, et al., "Toward Efficient Full Automatic Operation of the PWR Steam Generator with Water Level Adaptive Control," *BNES, London, Boiler Dynamics and Control in Nuclear Power Stations*, pp.309-329, 1980.
- [7] GRAHAM C. GOODWIN, KWAI SANG SIN, *Adaptive Filtering Prediction and control*, Prentice-Hall, INC., Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1984.
- [8] Wook Hyun Kwon and Dae Gyu Byun, "Receding horizon tracking control as a predictive control and its stability properties," *INT. J. Control*, Vol.50, No.5, pp.1807-1824, 1989.