

입력제약과 선행신호를 고려한 일반형 예측제어기법

Generalized Predictive Control with Feedforward and Input Constraints

박상현, 김창희**, 이상정*

*충남대학교 전자공학과 (Tel: 825-3991; Fax: 823-4494; E-mail: shpark@cslab.chungnam.ac.kr)

**한국원자력연구소 (Tel: 868-2405; Fax: 868-8357; E-mail: hwoi@nanum.kaeri.re.kr)

Abstract It is well known that the controller output limits have a significant effect on the closed loop system performance. Considering the input constraints in GPCF, an effective selection method of the control weighting(λ) is proposed to reduce the amplitude and the rate of control signals so that control signals lie within the limits. It is based on the relation between control weighting(λ) and optimal solution of the unconstrained GPCF. The GPCFIC algorithm chooses an λ at each sampling time so that all unconstrained GPCF output over the control horizon satisfy the rate and the amplitude constraints. In order to evaluate the performance of the GPCFIC, the computer simulations have been done for level control of PWR steam generator in low power operation, and shown satisfactory results.

Keywords Input Constraint, GPCFIC Algorithm, PWR Steam Generator

1. 서론

예측제어는 플랜트 모델을 이용하여 출력을 예측하기 때문에 사용하는 플랜트 모델에 따라 여러 가지 이론으로 발전하여 왔다. 그 중 적응제어기법에서 많이 사용하는 단일 입-출력 CARIMA 모델을 사용한 GPC(Generalized Predictive Control)[2,3]가 산업 플랜트에 널리 사용된다. GPC는 비최소 위상 시스템, 시간지연이나 플랜트 차수를 정확하게 알지 못하는 시스템, 불안정한 시스템에 대해 적용 가능하다는 장점을 갖고 있다.

산업플랜트에 많이 사용되는 밸브나 모터 등과 같은 구동기들은 동특성에 따른 물리적 제약 때문에 제한된 제어신호를 요구한다. 이 경우 과도한 제어신호는 제한치에 의해 차단되고, 이로 인해 폐루프 시스템의 성능이 나빠지는 결과가 발생한다[4]. 따라서, 제어시스템 설계시 입력제약을 고려한다는 것은 폐루프 시스템의 성능 향상 측면에서 대단히 중요하다. 입력제약을 고려한 예측제어기법으로 Garcia[5]는 QP문제(Quadratic Problem)를 DMC(Dynamic Matrix Control)에 적용한 QDMC를 제안하였고, Tsang[7]은 Lawson이 제안한 QP 문제를 GPC에 적용하였다. 그러나 QP는 해를 구하는 과정이 복잡하고, 계산 시간이 많이 소모되며, 경우에 따라서는 최적해가 존재하지 않는다는 단점이 있다. Chen[4]은 동적 제어 제한(dynamic control limit)을 제안하고 이를 MV(Minimum Variance)에 적용하였다. 이 방법은 MV의 비용함수를 다단계 비용함수로 바꾸어 최적해를 구하고, 구해진 미래 제어량들이 모두 크기 제한치 내에 있기 위한 제어량($u(t)$)의 범위를 찾는 것이다. 그러나 이 방법은 제어량의 크기를 제한하는 경우에는 사용할 수 있지만, 제어 변화량($\Delta u(t)$)을 제한하는 경우에는 사용할 수 없다.

본 논문에서는 제어기 출력의 변화량 및 크기 제약을 고려한 일반형 예측제어기법(GPCFIC: GPC with Feedforward and Input Constraints)을 제안한다. GPC는 다단계 비용 함수를 사용하기 때문에 매 샘플링 순간마다 NU 개의 제어 변화량($\Delta u(t+j-1)$,

$j=1, 2, \dots, NU$)이 모두 변화량 및 크기제약을 만족하도록 한다. 이것이 제어 입력 가중치(λ)가 증가하면 GPC의 최적 제어량인 제어 입력 변화량이 작아진다는 사실을 이용한 것이다.

2. 선행신호를 고려한 일반형 예측제어기법(GPCF)

예측제어기는 매 샘플링 순간마다 플랜트 모델의 출력값을 예측하고, 이들이 설정치에 도달하기 위해 요구되는 제어입력들을 모두 구한 후 그들 중 첫 번째 제어량만 플랜트 입력으로 사용한다. 따라서, 예측제어는 플랜트 모델의 미래 출력치들을 예측한다는 입장에서 모델-기반 예측제어기법(MBPC: Model Based Predictive Control)이라 부르기도 한다. GPC는 선행신호항을 갖지 않은 단일 입-출력 이산형 CARIMA 모델을 사용하고, 최적 제어량을 계산하기 위해 다음과 같은 비용함수를 사용한다.

$$J_{GPC} = \sum_{j=N_1}^{N_2} (y(t+j|t) - r(t+j))^2 + \sum_{j=1}^{NU} \lambda_j (\Delta u(t+j-1))^2 \quad (1)$$

여기서, $r(t+j)$ 는 안다고 가정한 미래 설정치이다. 그리고 N_1 , N_2 , NU , λ_j 등의 설계변수는 플랜트 특성에 따라 여러 가지 값으로 선정된다.

2.1 GPCF 제어기 설계

본 절에서는 GPC의 설계개념을 확장하여 그림 1과 같은 구조를 갖는 GPCF를 유도한다. 그림 1의 GPCF는 두 개의 오차신호(e_1 과 e_2)와 하나의 선행신호($u_3(t)$)를 입력으로 사용하고 있다. 따라서 GPCF의 비용함수는 다음과 같다.

$$J_{GPCF} = \sum_{j=N_1}^{N_2} (y(t+j|t) - r(t+j))^2 + \sum_{j=1}^{NU} \lambda_j (\Delta u_1(t+j-1))^2 + \sum_{j=1}^{NU} q_j (\Delta u_1(t+j-1) - \Delta u_2(t+j-1))^2 \quad (2)$$

여기서, q_j 는 제어입력 오차 가중치 열로 그림 1과 같은 구조를 갖는 시스템을 위해 새로 도입된 설계변수이다.

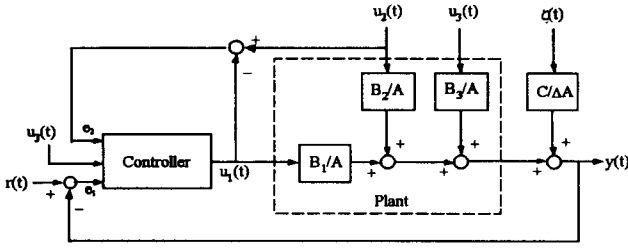


그림 1. 선행신호를 고려한 제어 시스템.
Fig. 1. The control system with Feedforward.

선행신호가 존재하는 플랜트를 다루기 위해 어떤 동작점에서 선형화된 다음과 같은 다중 입력 단일 출력의 이산 시스템 (CARIMA 모델)을 가정하자.

$$A(q^{-1})y(t) = B_1(q^{-1})u_1(t-1) + B_2(q^{-1})u_2(t-1) + B_3(q^{-1})u_3(t-1) + C(q^{-1})\frac{\zeta(t)}{\Delta} \quad (3)$$

여기서,

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots + a_nq^{-n} \quad (4)$$

$$B_1(q^{-1}) = q^{-d_1}(b_{10} + b_{11}q^{-1} + b_{12}q^{-2} + \dots + b_{1_{m1}}q^{-m}) \quad (5)$$

$$B_2(q^{-1}) = q^{-d_2}(b_{20} + b_{21}q^{-1} + b_{22}q^{-2} + \dots + b_{2_{m2}}q^{-m}) \quad (6)$$

$$B_3(q^{-1}) = q^{-d_3}(b_{30} + b_{31}q^{-1} + b_{32}q^{-2} + \dots + b_{3_{m3}}q^{-m}) \quad (7)$$

$$C(q^{-1}) = c_0 + c_1q^{-1} + c_2q^{-2} + \dots + c_nq^{-n} \quad (8)$$

$$\Delta = 1 - q^{-1} \quad (9)$$

이고, $y(t)$ 는 플랜트 출력을, $u_1(t)$ 는 제어 입력, 그리고 $u_2(t)$ 와 $u_3(t)$ 는 측정 또는 추정 가능한 선행신호이다. 그리고 $\zeta(t)$ 는 상관 관계가 없는 램덤 잡음을 나타내고, d_1, d_2, d_3 는 제어 입력 및 선행신호의 시간지연이다. 단, $d_1 \leq d_2$ 이고, $d_1 \leq d_3$ 로 가정한다. 비용함수의 j -단 앞선 출력 예측식을 플랜트 모델 (3)으로부터 구하기 위해 다음과 같은 diophantine 항등식을 도입한다.

$$1 = H_f(q^{-1})A(q^{-1})\Delta + q^{-j}F_f(q^{-1}) \quad (10)$$

여기서, $H_f(q^{-1})$ 와 $F_f(q^{-1})$ 는 플랜트 모델 $A(q^{-1})$ 와 예측구간 j 로부터 유일하게 결정되는 다항식이다[2]. 플랜트 모델 (3)과 식 (10)으로부터 구해지는 j -단 앞선 출력 예측식은 다음과 같다.

$$y(t+j) = G_j(q^{-1})\Delta u_1(t+j-1) + G_j^p(q^{-1})\Delta u_1(t-1) + M_j^p(q^{-1})\Delta u_2(t+j-1) + M_j^p(q^{-1})\Delta u_2(t-1) + P_j^p(q^{-1})\Delta u_3(t+j-1) + P_j^p(q^{-1})\Delta u_3(t-1) + F_j(q^{-1})y(t) + H_f(q^{-1})\zeta(t+1) \quad (11)$$

여기서, $C(q^{-1})$ 는 1로 가정하였다. 그리고 $G_j(q^{-1})$ 는 미래 제어 변화량에 관련된 다항식이고, $G_j^p(q^{-1})$ 는 이미 알고 있는 과거 제어 변화량에 관련된 다항식이다. 그리고, $M_j^p(q^{-1})$ 와 $P_j^p(q^{-1})$ 그리고 $M_j^p(q^{-1})$ 와 $P_j^p(q^{-1})$ 는 각각 미래 선행신호 변화량과 측정된 과거 선행신호 변화량에 관련된 다항식이다. $F_j(q^{-1})$ 와 $H_f(q^{-1})$ 는 각각 측정된 플랜트 출력과 미래 잡음신호에 관련된 다항식이다. 비용함수 (2)를 벡터로 표현하고, 이를 최소화하는 최적 변화량 벡터는 다음과 같다[9].

$$\bar{U}_1 = (G^T G + A + Q)^{-1} (G^T (\bar{r} - M\bar{U}_2 - P\bar{U}_3 - f) + Q\bar{U}_2) \quad (12)$$

GPC 방법에 따라 t 순간에 플랜트에 인가할 제어량을 식 (12)로부터 구하면,

$$u_1(t) = ([1 \ 0 \ 0 \ \dots] \times \bar{U}_1) + u_1(t-1) \quad (13)$$

과 같다. 여기서, $u_1(t-1)$ 은 플랜트에 인가한 과거 제어량이다.

3. 입력제약을 고려한 GPCF

3.1 입력제약을 고려한 GPCF(GPCFIC) 설계

GPCF는 다단계 비용함수를 사용하기 때문에 매 샘플링마다 NU 개의 제어 변화량이 구해진다. 따라서, 본 절에서는 λ 를 매 샘플링 순간마다 가변하여 NU 개의 제어 변화량 ($\Delta u(t+j-1)$)과 제어량 ($u(t+j-1)$, $j=1, 2, \dots, NU$)이 변화량과 크기 제한을 만족하도록 하는 GPCFIC를 제안한다. 그림 2는 GPCFIC의 폐루프 시스템 구조를 나타낸다.

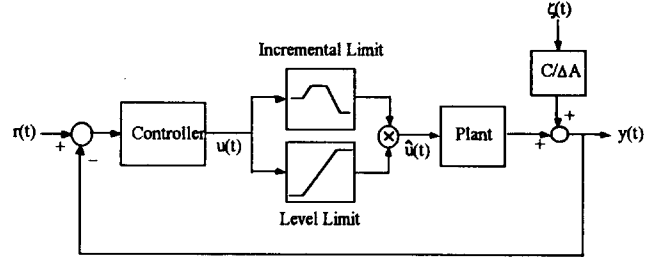


그림 2. GPCFIC의 폐루프 시스템 구조.
Fig. 2. The closed loop system structure of GPCFIC.

그림 2에서 $u_1(t)$ 는 제어기 출력이고, $\hat{u}_1(t)$ 는 변화량과 크기 제한에 의해 차단된 제어량으로 플랜트 입력을 나타낸다. 그리고 점선으로 표시된 부분은 플랜트이고, 플랜트의 각 다항식은 식 (3)에서 정의한 CARIMA 모델과 같다.

모든 플랜트 조건에 대해 항상 $u_1(t) = \hat{u}_1(t)$ 를 만족하도록 하는 GPCFIC를 유도하기 위해 다음과 같은 비용함수를 정의한다.

$$J_{GPCFIC} = \sum_{j=N_1}^M (y(t+j) - r(t+j))^2 + \sum_{j=1}^{NU} \lambda_j (\Delta u_1(t+j-1))^2 + \sum_{j=1}^{NU} q_j (\Delta u_1(t+j-1) - \Delta u_2(t+j-1))^2 \quad (14)$$

이때 비용함수에 대한 제약조건은

$$U_{\min}(t) \leq u(t+j-1) \leq U_{\max}(t), \quad U_{\min}(t) \leq \Delta u(t) \leq U_{\max}(t) \quad (15)$$

$$\Delta U_{low}(t) \leq \Delta u(t+j-1) \leq \Delta U_{high}(t), \quad \Delta U_{low}(t) \leq \Delta U_{high}(t) \quad (16)$$

이며, 여기서 $j=1, 2, \dots, NU$ 이다. 식 (14)-(16)에서 $U_{\min}(t)$ 와 $U_{\max}(t)$ 그리고 $\Delta U_{low}(t)$ 와 $\Delta U_{high}(t)$ 는 어떤 상수값 또는 가변값이고, $U_{\max}(t)$ 와 $\Delta U_{high}(t)$ 는 0보다 큰 값이다. 그리고 $\Delta U_{low}(t)$ 는 0보다 작은 값이다. 추정 가능한 선행신호의 최대값에 의한 플랜트 출력 변화가 플랜트 입력의 최대값에 의한 플랜트 출력 변화보다 크면 제어를 할 수 없기 때문에 다음과 같은 가정이 필요하다.

$$y_1(t) \geq y_2(t) \quad (17)$$

여기서 $y_1(t)$ 와 $y_2(t)$ 는 다음과 같다.

$$y_1(t) = \frac{B_1(q^{-1})}{A(q^{-1})} U_{\max}(t) \quad (18)$$

$$y_2(t) = \frac{B_2(q^{-1})}{A(q^{-1})} u_2(t)|_{\max} \quad (19)$$

식 (18)과 (19)에서 $U_{\max}(t)$ 는 $\hat{u}_1(t)$ 의 최대값이고, $u_2(t)|_{\max}$ 는 선행신호의 최대값이다.

제약조건 (15)과 (16)을 고려하지 않고, GPCFIC 비용함수 (14)를 최소화하는 최적 제어 변화량 벡터를 구하면 다음과 같다.

$$\bar{U}_1 = (G^T G + A + Q)^{-1} (G^T (\bar{r} - M\bar{U}_2 - P\bar{U}_3 - f) + Q\bar{U}_2) = \frac{adj(G^T G + A + Q)}{\det(G^T G + A + Q)} (G^T (\bar{r} - M\bar{U}_2 - P\bar{U}_3 - f) + Q\bar{U}_2) \quad (20)$$

여기서, \bar{U}_1 는 NU 크기의 벡터이고, $A = \text{diag}(\lambda_i)$, $Q = \text{diag}(q_i)$ 이다. 그러나 본 문제에서는 간단하게 λ_i 는 상수인 λ 로, q_i 는 상수인 q 로 가정한다. 그리고, $\det(\cdot)$ 는 디터민던트(determinant) 행렬이고, $\text{adj}(\cdot)$ 는 어드조인트(adjoint) 행렬을 나타낸다.

GPCFIC는 식 (20)에서 구해지는 NU 개의 제어 변화량 ($\Delta u_1(t+j-1)$)과 제어량 ($u_1(t+j-1)$)이 제약조건 (15)와 (16)을 만족하도록 λ 를 가변하는 방법을 사용한다. 이것은 식 (20)에서 구해지는 모든 제어량이 제약조건을 만족시키도록 하는 최적의 λ 를 찾는 문제가 된다. 이 문제의 해를 구하기 위해 식 (20)을 다음과 같이 정의한다.

$$\bar{U}_1 = \frac{\bar{K}}{G_1(\lambda)} \quad (21)$$

여기서,

$$G_1(\lambda) = \det(G^T G + A + Q) \quad (22)$$

$$= \lambda^{NU} + g_1^* \lambda^{NU-1} + g_2^* \lambda^{NU-2} + \dots + g_{NU-1}^* \lambda + g_{NU}^*$$

$$\bar{K} = \text{adj}(G^T G + A + Q) (G^T (\bar{r} - M\bar{U}_2 - P\bar{U}_3 - f) + Q\bar{U}_2) \quad (23)$$

$$= [k_1(\lambda) \ k_2(\lambda) \ \dots \ k_{NU}(\lambda)]^T$$

$$k_i(\lambda) = k_{i1} \lambda^{NU-1} + k_{i2} \lambda^{NU-2} + k_{i3} \lambda^{NU-3} + \dots + k_{iNU} \quad (24)$$

$j=1, 2, \dots, NU$ 이고, 식 (22)에서 g_i^* 는 설계변수로 주어진 q 를 포함하고 있다. 제약조건 (15)과 (16), 그리고 제어입력 변화량 (21)을 사용하여 제어기 출력의 변화량을 제한하는 경우, 크기를 제한하는 경우에 대해 최적의 λ 를 구하는 방법을 살펴보자.

3.1.1 제어기 출력의 변화량을 제한하는 경우

제어 변화량 ($\Delta u_1(t+j-1)$)이 변화량 제한조건 (16)을 만족하도록 하는 λ 를 구하기 위해 식 (21)을 다음과 같이 변환한다.

$$\begin{bmatrix} \Delta u(t) \\ \Delta u(t+1) \\ \vdots \\ \Delta u(t+NU-1) \end{bmatrix} = \frac{1}{G_1(\lambda)} \times \begin{bmatrix} k_1(\lambda) \\ k_2(\lambda) \\ \vdots \\ k_{NU}(\lambda) \end{bmatrix} \begin{matrix} \leq \Delta U_{high}(t) \\ \text{or} \\ \geq \Delta U_{low}(t) \end{matrix} \quad (25)$$

따라서, 식 (25)의 모든 제어 변화량이 변화량 제한을 만족시키기 위해서는 다음의 조건을 만족해야 한다.

3.1.1.1 변화량 제한조건 1

변화량 상한치 ($\Delta U_{high}(t)$) 제한은 식 (25)로부터 다음과 같은 부등식으로 표현된다.

$$\Delta U_{high}(t) \times G_1(\lambda) \geq k_1(\lambda) \quad (26)$$

$$\Delta U_{high}(t) \times G_1(\lambda) \geq k_2(\lambda) \quad (27)$$

...

$$\Delta U_{high}(t) \times G_1(\lambda) \geq k_{NU}(\lambda) \quad (28)$$

여기서, $\Delta U_{high}(t)$ 를 상수인 ΔU_{high} 로 가정하고, 식 (26)-(28)을 다음과 같이 표현한다.

$$\Delta U_{high} \lambda^{NU} + (\Delta U_{high} g_1 - k_{11}) \lambda^{NU-1} + \dots + (\Delta U_{high} g_{NU} - k_{1NU}) \geq 0 \quad (29)$$

$$\Delta U_{high} \lambda^{NU} + (\Delta U_{high} g_1 - k_{21}) \lambda^{NU-1} + \dots + (\Delta U_{high} g_{NU} - k_{2NU}) \geq 0 \quad (30)$$

$$\Delta U_{high} \lambda^{NU} + (\Delta U_{high} g_1 - k_{NU1}) \lambda^{NU-1} + \dots + (\Delta U_{high} g_{NU} - k_{NUNU}) \geq 0 \quad (31)$$

식 (29)-(31)에서 $\Delta U_{high}(t)$ 는 0보다 큰 값이므로 이들 다항식의 최고차 항은 양의 상수를 갖는다. 그리고 GPC 설계변수 선정기준에 따르면 $\lambda \geq 0$ [2,3]이므로 식 (29)-(31)을 만족시키는 λ 는 항상 존재한다. 따라서, 식 (29)를 만족하는 λ 중 가장 큰 λ 를 λ_{11} 이라 하고, 식 (30)을 만족하는 λ 를 λ_{12} 라 하고, 그리고 식

(31)을 만족하는 최적 λ 를 λ_{1NU} 라 하자. 그러면 식 (29)-(31)을 모두 만족하는 λ 는 다음과 같다.

$$\lambda_{\Delta high} = \max \{0, \lambda_{11}, \lambda_{12}, \dots, \lambda_{1NU}\} \quad (32)$$

3.1.1.2 변화량 제한조건 2

식 (25)와 변화량 제한조건 1로부터 변화량 하한치 ($\Delta U_{low}(t)$) 제한을 다음과 같은 부등식으로 표현한다. 단, $\Delta U_{low}(t)$ 는 음의 상수인 ΔU_{low} 로 가정한다.

$$\Delta U_{low} \lambda^{NU} + (\Delta U_{low} g_1 - k_{11}) \lambda^{NU-1} + \dots + (\Delta U_{low} g_{NU} - k_{1NU}) \leq 0 \quad (33)$$

$$\Delta U_{low} \lambda^{NU} + (\Delta U_{low} g_1 - k_{21}) \lambda^{NU-1} + \dots + (\Delta U_{low} g_{NU} - k_{2NU}) \leq 0 \quad (34)$$

$$\Delta U_{low} \lambda^{NU} + (\Delta U_{low} g_1 - k_{NU1}) \lambda^{NU-1} + \dots + (\Delta U_{low} g_{NU} - k_{NUNU}) \leq 0 \quad (35)$$

여기서, ΔU_{low} 는 음의 값이므로 식 (33)-(35)는 양의 부등식이 되고, 최고차 항은 양의 상수를 갖는다. 변화량 제한조건 1과 같은 방법으로 식 (33)-(35)를 모두 만족하는 λ 를 구하면 다음과 같다.

$$\lambda_{\Delta low} = \max \{0, \lambda_{11}, \lambda_{12}, \dots, \lambda_{1NU}\} \quad (36)$$

3.1.2 제어기 출력의 크기를 제한하는 경우

NU 개의 제어량 ($u_1(t+j-1)$)이 크기 제한조건 (15)를 만족하도록 하는 λ 를 구하기 위해 식 (21)을 다음과 같이 변환한다.

$$\begin{bmatrix} u(t) \\ u(t+1) \\ \vdots \\ u(t+NU-1) \end{bmatrix} = \frac{\bar{K}}{G_1(\lambda)} \times \begin{bmatrix} u(t-1) \\ u(t) \\ \vdots \\ u(t+NU-2) \end{bmatrix} \begin{matrix} \leq U_{\max}(t) \\ \text{or} \\ \geq U_{\min}(t) \end{matrix} \quad (37)$$

식 (37)의 모든 제어량이 크기 제한을 만족하기 위해서는 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

3.1.2.1 크기 제한조건 1

식 (37)로부터 크기 제한의 상한치 ($U_{\max}(t)$)를 만족하기 위한 부등식은 다음과 같이 표현된다. 이때, $U_{\max}(t)$ 는 상수인 U_{\max} 로 가정한다.

$$\frac{k_1(\lambda)}{G_1(\lambda)} + u(t-1) \leq U_{\max} \quad (38)$$

$$\frac{k_2(\lambda)}{G_1(\lambda)} + u(t) \leq U_{\max} \quad (39)$$

...

$$\frac{k_{NU}(\lambda)}{G_1(\lambda)} + u(t+NU-1) \leq U_{\max} \quad (40)$$

여기서, $u(t-1)$ 은 플랜트의 과거 입력값으로 크기제한을 만족하였다고 가정한다. 그러나 $u(t)$ 나 $u(t+1)$ 등과 같은 미래 제어량은 크기제한 조건에 의해 구해져야 할 값으로 현재 시각 t 에서는 알 수 없는 값이다. 그러나, 식 (38)-(40)은 순환형 구조로 되어 있기 때문에 식 (40)을 일반형으로 변환하여 크기제한의 상한치를 만족하는 λ 를 찾는다. 식 (38)-(40)의 좌변 항을 식 (40)의 $u(t+NU-1)$ 에 순차적으로 대입하여 정리하면 식 (40)은 다음과 같은 일반형이 된다.

$$(U_{\max} - u(t-1)) G_1(\lambda) - k_{NU}(\lambda) - k_{NU-1}(\lambda) - \dots - k_3(\lambda) - k_2(\lambda) - k_1(\lambda) \geq 0 \quad (41)$$

여기서, 미지수 λ 를 제외한 모든 값들은 현재 시각 t 에서 아는 값이다. 그리고 U_{\max} 는 0보다 큰 상수이고, $u(t-1)$ 는 크기제한을 만족한 과거값이므로 식 (41)의 최고차 항은 양의 상수를 갖는다. 그리고, 변화량 제한조건에서처럼 $\lambda \geq 0$ 이므로 식 (41)을

만족하는 λ 는 항상 존재한다. 식 (41)을 만족하는 λ 즉, 식 (41)의 근을 각각 λ_{31} , λ_{32} 그리고, λ_{3NU} 라 하면 최적 λ 는 이들 중 가장 큰 값이므로 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda_{\max} = \max(0, \lambda_{31}, \lambda_{32}, \dots, \lambda_{3NU}) \quad (42)$$

3.1.2.2 크기 제한조건 2

식 (37)으로부터 크기제한의 하한치($U_{\min}(t)$)를 만족하기 위한 부등식을 크기 제한조건 1과 같은 방법으로 구하고, 일반형으로 표현하면 다음과 같다. 단, $U_{\min}(t)$ 는 상수인 U_{\min} 으로 가정한다.

$$(U_{\min} - u(t-1))G_1(\lambda) - k_{NU}(\lambda) - k_{NU-1}(\lambda) - \dots - k_2(\lambda) - k_1(\lambda) \leq 0 \quad (43)$$

여기서, 일반적으로 U_{\min} 은 0, 또는 0보다 작은 상수값이고, $u(t-1)$ 는 크기제한을 만족한 과거값이므로 식 (43)은 양의 부등식이고, 최고차 항은 양의 상수를 갖는다. 크기 제한조건 1에서와 같은 방법으로 식 (43)을 만족하는 λ 를 각각 λ_{41} , λ_{42} 그리고, λ_{4NU} 라 하면 최적 λ 는 이들 중 가장 큰 값이므로 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda_{\min} = \max(0, \lambda_{41}, \lambda_{42}, \dots, \lambda_{4NU}) \quad (44)$$

4. 모의 실험 및 성능 평가

본 장에서는 제안된 GPCFIC의 성능을 평가하기 위해 857MWt 가압경수로(PWR: pressurized water reactor)형 원전의 증기발생기 모델을 사용하여 증기발생기 수위제어에 대한 모의실험을 수행하였다. 모의실험은 원자로 출력 5%에서부터 20%까지 저출력 운전에 대해 증기발생기 변동 시나리오를 사용하여 제안된 GPCFIC와 입력제약을 고려하지 않은 GPCF 간의 성능을 비교하였다.

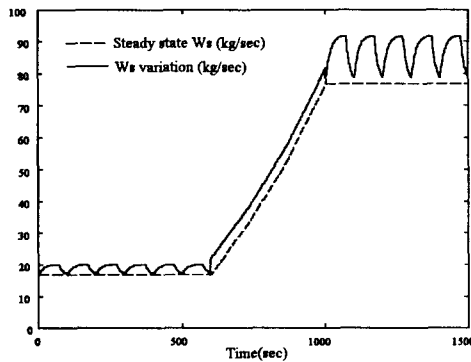


그림 3. 자동 증기 덤프 운전 시나리오.

Fig. 3. The operating scenario of auto steam-dump.

원자력 발전소의 정상 운전 절차에 따르면, 원자력 출력 약 17% 이하인 계통 병입 전에는 증기발생기에서 생성된 증기를 복수기로 덤프하고, 계통 병입 후에는 증기를 터빈에 공급하여 전기를 생산한다. 계통 병입 전의 증기 유량 덤프 운전에서는 증기 덤프 계통이 증기 덤프 밸브를 자동으로 조절하여 주증기 헤드 압력을 무부하 증기 압력인 76.6kg/cm^2 으로 유지한다. 만약 증기 유량이 증가하여 주증기 헤드 압력이 76.6kg/cm^2 를 초과하면, 증기 덤프 밸브는 자동으로 열려 여분의 증기를 복수기로 보낸다. 이와 같은 이유로 그림 3과 같은 증기유량 변화 시나리오를 사용하여 제안된 제어기의 성능을 평가하였다.

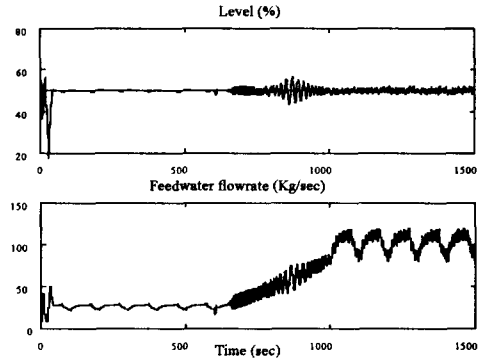


그림 4. 자동 증기 덤프 실험 결과.

Fig. 4. The simulation results of auto steam-dump.

5. 결 론

제어기의 제어 변화량 제한 및 크기제한으로 인해 플랜트 출력은 큰 오버슈트가 발생하고, 경우에 따라서는 불안정한 결과를 보인다. 본 논문에서는 일반형 예측제어기법을 확장하여 입력 제약과 선행신호를 고려한 예측제어기법(GPCFIC)을 제안하였다. GPCFIC는 GPCF의 최적 제어량인 $\Delta u(t+j-1)$ 와 $u(t+j-1)$ 가 변화량 및 크기제한을 만족하도록 하기 위한 조건으로부터 최적 제어입력 가중치를 구하는 방법을 유도하였다.

제안된 GPCFIC의 타당성과 성능을 확인하기 위해 웨스팅하우스 857MWt 증기발생기 모델을 사용하여 원자로 출력 5%에서부터 20%까지 저출력 운전에 대해 모의실험을 수행하였다. 모의실험 결과 매 샘플링 순간마다 제어 입력 가중치를 가변하는 GPCFIC는 GPCF에 비해 모든 운전구간에서 우수한 결과를 나타내었다.

참 고 문 헌

- [1] R. M. Andrew et al., "Analysis and Tuning of Adaptive GPC," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 69, pp. 97-110, 1991.
- [2] D. W. Clark et al., "Generalized Predictive Control-Part I & II," *Automatica*, vol. 23, no. 2, pp. 137-160, 1987.
- [3] D. W. Clark et al., "Properties of Generalized Predictive Control," *Automatica*, vol. 25, no. 6, pp. 859-875, 1989.
- [4] G. P. Chen et al., "Control Limits Consideration in Discrete Control System Design," *IEE Proc. Part D*, vol. 140, no. 6, pp. 413-422, 1993.
- [5] C. E. Garcia et al., "Solution of the Quadratic Dynamic Matrix Control Problem via Quadratic Programming," *Proc. of the Conf. of the Canadian Industrial Computing Society*, Ottawa, Canada, pp. 13.1-13.2, 1984.
- [6] Soeterboek, *Predictive Control: a Unified Approach*. Prentice-Hall Inc., New York, 1992.
- [7] T. T. C. Tsang, "Generalized Predictive Control with Input Constraints," *IEE Proc. Part D*, vol. 135, 1988.
- [8] P. S. Tuffs et al., "Self-Tuning Control of Offset: a Unified Approach," *IEE Proc. Part D*, vol. 132, no. 3, pp. 100-110, 1985.
- [9] C. H. Kim et al., "Self-tuning predictive control with application to steam generator," *Proc. IFAC '96, San Francisco, USA*, June 30-July 5, 1996.