

혼합 H_∞ 최적화 기법을 이용한 견실 H_∞ 증기발생기 수위제어기 설계

Robust H_∞ Controller Design for Steam Generator Water Level Control using Mixed H_∞ Optimization Method

서성환, 조희수, 박홍배
(Sung Hwan Seo, Hee Soo Cho, and Hong Bae Park)

Abstract : In this paper, we design the robust H_∞ controller for water level control of steam generator using a mixed H_∞ optimization with model-matching method. Firstly we choose the desired model which has good disturbance rejection performance. Secondly we design a stabilizing controller to keep the model-matching error small and also provide sufficiently large stability margin against additive perturbations of the nominal plant. Simulation results show that proposed robust H_∞ controller at specific power operation has satisfactory performances against the variations of load power, steam flow rate, primary circuit coolant temperature, and feedwater temperature. It can be also observed that the proposed robust H_∞ controller exhibits better robust stability than conventional PI controller.

Keywords : steam generator, water level control, robust H_∞ control, model-matching

I. 서론

원자력 발전설비중 증기발생기(steam generator)는 1차계통에서 원자로 노심을 거친 고온의 냉각재와 2차계통의 주급수사이의 열교환을 통해 터빈으로 공급될 증기를 만들어내는 수직 U-튜브형 열교환기이다. 증기발생기 수위제어계통은 증기발생기에 적절한 양의 주급수를 공급하여 증기발생기의 수위를 설정치에 유지시킴으로써 1차계통에서 생성된 열을 효과적으로 제거하고 터빈-발전기에 필요한 증기량을 공급하는 중요한 역할을 수행한다. 수위가 너무 낮을 경우 1차계통의 냉각효과 감소로 인한 연료손실을 막기 위해 원자로가 정지되며, 수위가 너무 높을 경우 습분 분리기의 기능을 저하시켜 허용치 이상의 습분을 함유한 증기가 터빈 날개의 마모를 가져오므로 이를 막기 위해 터빈이 정지된다. 따라서 증기발생기의 안정된 수위제어는 원자력 발전 설비의 안전과 이용률을 크게 좌우한다. 그러나 저출력 운전시에 증기발생기내의 기포 체적이 크게 변화하여 응축, 팽창현상으로 인한 수위변동이 크고 증기유량의 측정오차가 커서 이를 제어 입력신호로 이용할 경우 불확실성이 존재한다. 그리고 원자력 발전소의 플랜트들은 정상상태, 과도상태 및 기동상태에 따라 동특성의 변화가 심하고 비선형성이 강해 특정 동작점 근처에서 설계한 고정된 PI 제어기로는 부하출력이 변할 경우 원하는 안정성 여유(stability margin)내에 수위를 조절하기가 쉽지 않다. 이에 수위제어기 설계를 위한 많은 제어기법들이 제안되었

다[1]-[8]. 이중 [6][7]에서 H_∞ 수위제어기법이 소개된 이후 [8]에서 정규화된 소인수요소 접근법으로 H_∞ 제어기를 설계하였다.

본 논문에서는 불확실성이 존재하더라도 안정성을 보장하고 원하는 성능을 가지는 증기발생기 수위제어를 위한 견실 H_∞ 제어기 설계를 위해 모델정합 문제를 포함한 혼합 H_∞ 최적화기법(mixed H_∞ optimization with model-matching)을 제안한다. 먼저 증기유량, 1차측 냉각재 온도 및 주급수온도의 변화들로 인한 수위변화를 출력에 미치는 의란으로 고려하여 좋은 외란제거의 성능을 가지는 폐루프 전달함수를 이상모델(desired model)로 선택한다. 다음으로 부하출력이 변할 경우 플랜트모델과 공칭플랜트사이의 모델오차에 대한 충분히 큰 안정성 여유도를 가지며 이상모델과의 모델정합오차를 최소로 유지하는 견실 H_∞ 제어기를 설계한다.

시뮬레이션을 통해, 특정 부하출력에서 설계한 견실 H_∞ 제어기가 부하출력이 변할 때도 증기유량, 1차측 냉각재 온도 및 주급수온도의 변화들에 대해 좋은 성능을 보이며 고전적 PI 제어기보다 견실안정성면에서 향상됨을 확인한다.

II. 증기발생기 모델의 수학적 표현

Irving 등[1]은 주급수유량과 증기유량의 계단변화에 따른 증기발생기 수위변화의 계단응답에 기초하여 수위변화, 주급수유량의 변화 및 증기유량의 변화 항으로 표현된 4차의 전달함수를 이끌어 내었다. 이 모델은 주급수유량의 변화에 따른 역동적 특성의 영향이 증기유량의 변화에 따른 동특성과 같다고 가정하였다. 그러나 실제상태에서는 서로 상당한 차이를 나타내며 1차측 냉각재온도와 주급수온도의 변화들의 영향을 고려하지 않았다. 이런 문제를 해결하기 위해 Lee 등[9][10]이 적용한

접수일자 : 1998. 7. 13., 수정완료 : 1998. 12. 9.

서성환, 박홍배 : 경북대학교 전자전기공학부

조희수 : 서울지방중소기업청

* 본 논문은 1997년도 기초전력 공학 공동연구소에서 지원하여 연구하였습니다. 관계기관에 감사 드립니다. (과제번호 97-004)

857MWt Westinghouse F-type 증기발생기의 열수력학적 모델에 바탕을 둔 4개의 입력, 1개의 출력을 가지는 선형 전달함수를 채택하였다. 이 모델에서 증기발생기의 수위변화에 영향을 미치는 주요 인자는 주급수유량의 변화, 증기유량의 변화, 1차측 냉각재온도의 변화 및 주급수의 온도변화이다. 증기발생기의 수위변화는 이들 상호 작용이 없는 4개의 입력인자들과 그들 자신의 전달함수들의 곱으로 얻어진다. 이 모델의 수학적 표현은

$$\begin{aligned} \Delta L(s) = & G_1(s) \Delta W_f(s) + G_2(s) \Delta W_s(s) \\ & + G_3(s) \Delta T_p(s) + G_4(s) \Delta T_f(s) \end{aligned} \quad (1)$$

과 같다. 여기서 L , W_f , W_s , T_p , T_f 는 각각 수위(%), 주급수유량(Kg/sec), 증기유량(Kg/sec), 1차측 냉각재온도(K), 그리고 주급수온도(K)를 나타낸다. 또 기호 Δ 는 현재 값과 주어진 초기 동작조건의 정상상태 값 사이의 차이를 의미한다. (1)에서 4개의 전달함수는 각각

$$\begin{aligned} G_1(s) &= \frac{k_1}{s} + \frac{k_2 w_{nl}^2}{s^2 + 2\zeta_1 w_{nl}s + w_{nl}^2} \\ G_2(s) &= -\frac{k_1}{s} + \frac{0.05 k_3}{s + 0.05} \\ G_3(s) &= \left[\frac{k_4(a_3 - b_3)s}{(s + a_3)(s + b_3)} + \frac{c_3 k_5}{s + c_3} \right] \exp(-d_3 s) \\ G_4(s) &= \frac{k_6 w_{nl}^2}{s^2 + 2\zeta_4 w_{nl}s + w_{nl}^2} \end{aligned} \quad (2)$$

이다. 각 전달함수의 계수들은 일정 부하출력에서 특정 인자를 제외한 나머지 인자들을 고정시키고, 특정인자를 변화시켰을 때 증기발생기의 수위응답과 비선형 모델의 수위응답과의 차이를 최소화하는 계수를 얻는다. 이러한 과정을 여러 값의 부하출력 상태에 대해 반복하여 각 계수들의 부하출력(p)에 대한 함수를 다항식으로 표현하였다. 4개의 전달함수에 대한 계수추출법에 의해 얻어진 계수들은

$$\begin{aligned} k_1 &= 1.11 \times 10^{-4}, \\ k_2 &= -0.012097 e^{-0.09067p} - 0.001, \\ \zeta_1 &= 0.1985 e^{0.03p}, \\ t_{pl} &= 196.37 e^{-0.1245p} + 30, \\ w_{nl} &= \frac{3.141592}{t_{pl} \sqrt{1 - \zeta_1^2}}, \\ k_3 &= 0.0196 e^{-0.0735p} + 0.007, \\ k_4 &= \begin{cases} 1.17 \times 10^{-5} p^3 - 6 \times 10^{-4} p^2 + 0.01p + 0.0223, & p \leq 25 \\ 0.081 - 0.0004(p-25), & p > 25 \end{cases} \\ k_5 &= \begin{cases} -2 \times 10^{-7} p^3 + 1.1 \times 10^{-5} p^2 + 2.7 \times 10^{-4} p \\ + 0.0014, & p \leq 50 \\ 2.58 \times 10^{-4}(p-50) + 0.0201, & p > 50 \end{cases} \\ a_3 &= \begin{cases} 0.0195p + 0.0846, & p \leq 10 \\ 0.0107p + 0.1725, & 10 < p \leq 15 \\ 0.0082p + 0.21, & 15 < p \leq 20 \\ 0.0125p + 0.124, & p > 20 \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

$$b_3 = \frac{a_3}{10},$$

$$c_3 = \begin{cases} 0.001p, & p \leq 5 \\ 0.399p - 1.99, & 5 < p \leq 10 \\ 2.0, & p > 10 \end{cases}$$

$$d_3 = 2,$$

$$k_6 = 4.43 \times 10^{-4} e^{0.0348p},$$

$$\zeta_4 = \begin{cases} 0.535 e^{-0.16p}, & p \leq 15 \\ 0.172, & p > 15 \end{cases}$$

$$t_{pl} = 195 e^{-0.16p} + 22,$$

$$w_{nl} = \frac{3.141592}{t_{pl} \sqrt{1 - \zeta_4^2}}$$

과 같다. 그림 1은 각 인자들이 여러 동작점에서 단위계단으로 증가할 경우 모델의 수위응답을 나타낸다.

(2)에서 $G_1(s)$, $G_2(s)$ 의 두 번째 항은 응축 및 팽창현상을 나타낸 항으로 그림 1(a) 및 그림 1(b)와 같이 출력이 낮을수록 심하며, 그림 1(c) 및 그림 1(d)에서 1차측 냉각재온도와 주급수온도의 변화에 대한 수위변화는 시간이 지남에 따라 수렴한다. 즉 수위변화의 주된 인자는 증기유량과 주급수유량의 변화이며 수위변화가 없는 정상상태에서 증기유량과 주급수유량은 같아야 한다.

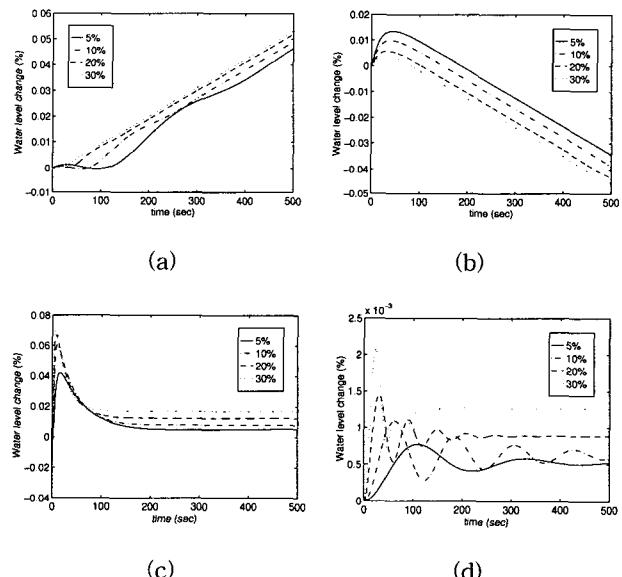


그림 1. 여러 동작점에서 증기발생기 모델의 단위계단응답.

Fig. 1. The water level responses of S/G model for unit step change of one plant input for four operating points. (a) level response of S/G model to unit step increase of W_f , (b) level response of S/G model to unit step increase of W_s , (c) level response of S/G model to unit step increase of T_p , (d) level response of S/G model to unit step increase of T_f .

III. 수위제어기 설계

1. 모델정합 문제와 견실안정화 문제

이 절에서는 제어기 설계를 위한 기본 개념을 소개한다. 모델정합 문제는 폐루프 케환시스템의 출력이 미리 설정된 이상모델의 출력을 따라가도록 하는 안정화 제어기를 설계하는 것이다. 그림 2에서 w 와 z 사이의 전달함수는 모델정합오차이며 (4)와 같다. 즉, 모델정합 문제는 모델정합오차 $E(s)$ 의 H_{∞} -노음을 최소화시키는 안정화 제어기 $K(s)$ 를 구하는 것이다.

$$\begin{aligned} E(s) &= \frac{z}{w} \\ &= H_D(s) - G(s)K(s)(I + G(s)K(s))^{-1} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $G(s)$ 는 주어진 플랜트이고 $H_D(s)$ 는 설계목적을 만족시키는 저차의 이상모델이다.

그림 3과 같이 가산섭동이 존재하는 케환시스템에 대한 견실안정화 문제는 (5)로 표현되는 가산 안정성 여유도

$$\delta_a = \frac{1}{\|K(I + GK)^{-1}\|_{\infty}} \quad (5)$$

를 크게 하기 위해 $T_{zw} = z/w = K(I + GK)^{-1}$ 의 H_{∞} -노음을 최소화시키는 안정화 제어기 $K(s)$ 를 구하는 것이다.

2. 이상모델의 설정

증기유량, 1차측 냉각재온도 및 주급수온도의 변화들로 인한 수위변화를 출력에 미치는 외란으로 간주하면 이 세 가지의 인자들이 계단형으로 증가할 경우 수위변화는 램프형 감소로 극사화된다. 따라서 그림 4와 같이 램프형으로 감소하는 출력 외란(d)이 가해질 때 정상상태오차를 제거시키는 케환시스템의 전달함수를 이상모델로 설정한다.

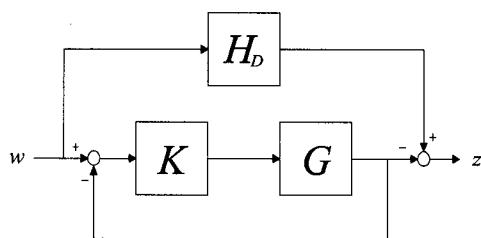


그림 2. 모델정합 구조.

Fig. 2. The structure of model-matching.

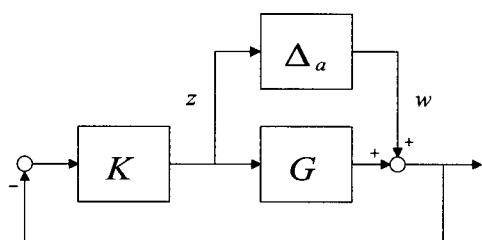


그림 3. 가산섭동이 존재하는 케환시스템.

Fig. 3. Feedback system with additive model error.

표 1. 여러 동작점에서 $G_1(s)$ 의 영점들.

Table 1. Right half plane zeros of $G_1(s)$ for various operating points.

	5%	10%	15%	20%	25%	30%
z	$0.0170 \pm 0.0168i$	$0.0279 \pm 0.0253i$	$0.0389 \pm 0.0385i$	$0.0453 \pm 0.0570i$	$0.0443 \pm 0.0776i$	$0.0373 \pm 0.0968i$
$ z $	0.0238	0.0377	0.0548	0.0728	0.0894	0.1038

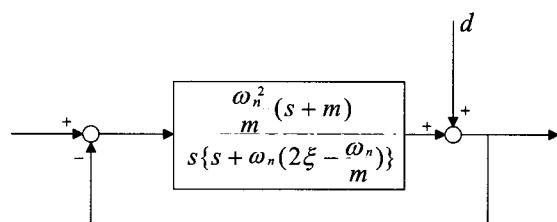


그림 4. 이상모델의 설정을 위한 블록선도.

Fig. 4. The block diagram for designing desired model.

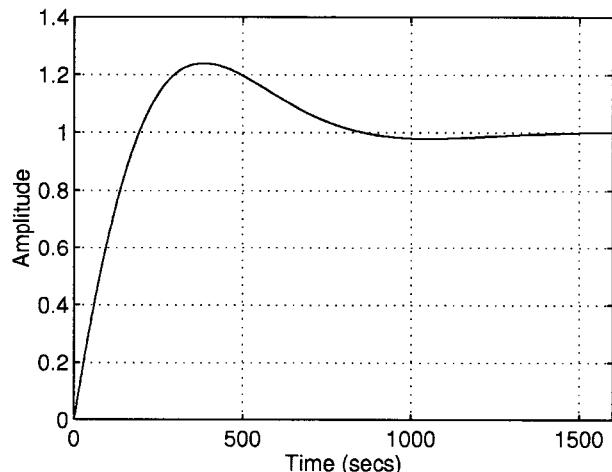


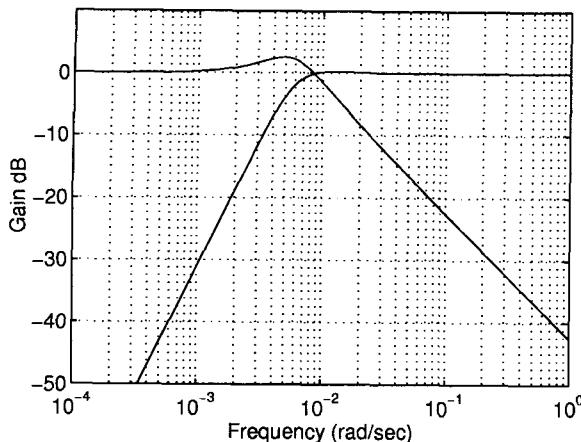
그림 5. 이상모델의 단위계단 응답.

Fig. 5. Unit step response of H_D .

증기발생기는 대표적인 비최소위상 시스템으로 우반면의 영점을 대역폭 설정에 있어 설계제약을 가져온다. 그림 7의 실제시스템에서 저출력 운전시의 플랜트 $G_1(s)$ 의 우반면의 영점을 표 1에 보였다. 폐루프시스템의 안정화와 원하는 성능을 보장하기 위해 대역폭이 실제플랜트의 우반면에 있는 영점의 크기보다 작게 한다[11].

그리고, 그림 5와 같이 얻어진 이상모델의 단위계단 응답에서 오버슈트와 정상상태 도달시간은 설계될 제어기의 이득에 직결되므로, 적절하게 설정하여 제어기의 출력신호인 주급수유량의 변화가 실제 구현 가능한 값이 되도록 한다. 이런 조건들을 이용하여 그림 4의 m , ξ , ω_n 을 정한 후, 설정한 이상모델은

$$H_D(s) = \frac{7.44 \times 10^{-3}s + 3.6 \times 10^{-5}}{s^2 + 7.44 \times 10^{-3}s + 3.6 \times 10^{-5}} \quad (6)$$

그림 6. 감도함수와 H_D 의 보드선도.Fig. 6. Bode magnitude plots of sensitivity function and H_D .

과 같다. 그림 5는 $H_D(s)$ 의 단위계단 응답을, 그림 6은 감도함수와 $H_D(s)$ 의 보드선도를 나타낸다. 설계 관점에 따라 $H_D(s)$ 를 보조감도함수(complementary sensitivity function)로 볼 수 있다. $S_D(s)$ 를 출력외란의 제거성능을 가지는 이상적인 감도함수(sensitivity function)라 하고 그림 6과 같이 $H_D = I - S_D$ 를 만족하도록 이상모델을 설계할 경우, (4)는

$$H_D - GK(I + GK)^{-1} = (I + GK)^{-1} - S_D \quad (7)$$

과 같으며 모델정합 문제는 감도함수 정합오차를 줄이는 문제와 등가가 된다.

3. 혼합 H_∞ 최적화 문제를 이용한 제어기 설계

모델정합만으로 설계된 페루프 케환시스템은 플랜트의 섭동에 너무 민감하다[12]. 따라서 본 논문에서는 모델정합과 동시에 부하출력이 변할 경우 플랜트 모델과 공칭플랜트 사이의 모델오차에 대한 안정성 여유도 최대화를 동시에 고려한다.

견실 H_∞ 제어기 설계를 위한 모델정합 문제와 견실 안정화 문제를 동시에 고려한 혼합 H_∞ 최적화 문제를 하중함수를 포함하여 나타내면

$$\min_{K(s)} \left\| \begin{array}{c} W_1(H_D - GK(I + GK)^{-1})W_3 \\ W_2K(I + GK)^{-1}W_3 \end{array} \right\|_\infty \quad (8)$$

과 같다. (8)의 최소화 문제를 아래 선형분수변환(LLFT : lower linear fractional transformation) 형태[13]로 표현하면

$$\| F_l(P, K) \|_\infty = \left\| \begin{array}{c} W_1(H_D - GK(I + GK)^{-1})W_3 \\ W_2K(I + GK)^{-1}W_3 \end{array} \right\|_\infty \quad (9)$$

와 같고 표준플랜트를 구하면

$$P = \left[\begin{array}{c|c} W_1H_DW_3 & -W_1G \\ \hline 0 & W_2 \\ \hline W_3 & -G \end{array} \right] \quad (10)$$

으로 표시된다. 상태공간표현으로 나타내기 위해

$$\begin{aligned} H_D(s) &= \hat{c}(sI - \hat{a})^{-1}\hat{b} + \hat{d}, \\ G(s) &= c(sI - a)^{-1}b + d, \\ W_i(s) &= c_i(sI - a_i)^{-1}b_i + d_i, \quad i=1, 2, 3 \end{aligned} \quad (11)$$

로 두면,

$$P(s) = C_P(sI - A_P)^{-1}B_P + D_P \quad (12)$$

로 표현되는 $P(s)$ 의 상태공간표현은

$$A_P = \begin{bmatrix} a_1 & b_1\hat{c} & b_1\hat{d}c_3 & 0 & b_1c \\ 0 & \hat{a} & \hat{b}c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a \end{bmatrix},$$

$$B_P = \begin{bmatrix} b_1\hat{d}c_3 & -b_1d \\ \hat{b}d_3 & 0 \\ b_3 & 0 \\ 0 & b_2 \\ 0 & -b \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$C_P = \begin{bmatrix} c_1 & d_1\hat{c} & d_1\hat{d}c_3 & 0 & d_1c \\ 0 & 0 & 0 & c_2 & 0 \\ 0 & 0 & c_3 & 0 & c \end{bmatrix},$$

$$D_P = \begin{bmatrix} d_1\hat{d}c_3 & -d_1d \\ 0 & d_2 \\ d_3 & -d \end{bmatrix}$$

과 같으며, 각각의 분할은 $P(s)$ 구조의 차원과 일치함을 의미한다. 여기서 $G(s)$ 는 부하출력이 30%일 때 주급수 유량의 변화와 증기발생기 수위변화의 관계식 $G_1(s)$ 를 공칭플랜트로 결정한 후 루프쉐이핑 기법[14]에 의해 변형시킨 플랜트이다. 하중함수 $W_1(s)$, $W_2(s)$, $W_3(s)$ 를 결정한 후 Glover-Doyle 알고리듬[15]을 이용해 (8)을 만족시키는 변형된 플랜트를 위한 제어기를 설계한다. 다음으로 루프쉐이핑에 사용한 하중함수를 설계한 제어기에 포함시킴으로써 공칭플랜트 $G_1(s)$ 를 위한 최종제어기 $K(s)$ 를 얻어낸다. 이때 Glover-Doyle 알고리듬을 위한 전제조건들을 만족시키고 원하는 개루프 특성을 가지고 록 하는 루프쉐이핑을 위한 하중함수는 $5s/(s+10^{-4})$ 로 선택하였다. $W_1(s)$ 는 정상상태 추종성능과 저주파 영역에 주로 존재하는 외란의 제거성능을 위하여 높은 이득의 저역통과 필터 형태로 선택하고, $W_2(s)$ 는 페루프시스템의 고주파 영역에서 시스템 파라미터 오차에 대한 견실안정성의 향상을 위하여 고역통과 필터 형태로 선택하였다. $W_3(s)$ 는 모델정합 문제와 견실안정화 문제사이의 상호결충(tradeoff)에 관여된 하중함수이다. 시행착오를 거쳐 선택한 하중함수는

$$W_1(s) = \frac{0.2s + 0.009}{s + 9 \times 10^{-9}}, \quad W_2(s) = \frac{0.3s + 0.02143}{0.01s + 1000},$$

$$W_3(s) = \frac{10^{-5}s + 10^{-8}}{s + 5 \times 10^{-5}} \quad (14)$$

와 같고, 최종제어기는

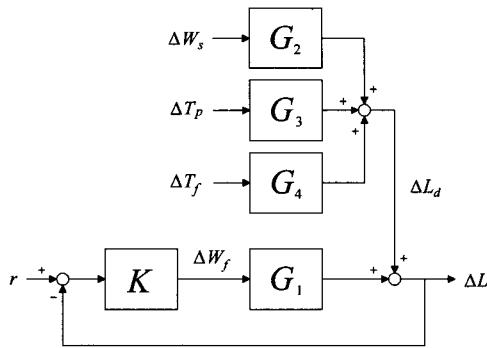


그림 7. 수위제어 계통도.

Fig. 7. Overall control system including steam generator.

$$K(s) = \frac{4.192 \times 10^{-4}s^8 + 41.92s^7 + 5.601s^6 + 0.5955s^5 + 1.528 \times 10^{-2}s^4 + 7.447 \times 10^{-5}s^3 + 6.545 \times 10^{-8}s^2 + 5.816 \times 10^{-12}s}{s^9 + 0.9891s^8 + 0.4923s^7 + 0.05607s^6 + 6.296 \times 10^{-3}s^5 + 1.887 \times 10^{-4}s^4 + 2.199 \times 10^{-7}s^3 + 2.101 \times 10^{-11}s^2 + 9.036 \times 10^{-17}s + 8.127 \times 10^{-25}} \quad (15)$$

이다. 그림 7은 본 논문의 증기발생기 수위제어 계통도이다. 증기유량, 1차측 냉각재온도 및 주급수온도의 변화들로 인한 수위변화가 증기발생기 수위의 출력에 미치는 외란으로 작용하고 설계한 제어기 $K(s)$ 가 적절한 주급수유량의 변화를 증기발생기에 공급함으로써 수위변화가 기준입력(0%)을 따라가도록 한다.

V. 시뮬레이션 결과

표 2는 여러 동작점에서 수위에 영향을 미치는 각각의 인자들의 정상상태 값을 나타낸다. 그림 8은 857MWt Westinghouse F-type 증기발생기에서 사용되는 PI 제어계통을 이용한 결과로서 출력이 30%일 때 조절된 PI 제어기의 경우이다. 그림 9는 출력이 30%일 때를 공칭플랜트로 설정하여 설계한 견실 H_∞ 제어기를 이용한 결과이다. 100초와 2000초에서 증기유량이 정상상태 값의 20%만큼 계단형으로 증가/감소할 경우 증기발생기로 공급되는 주급수유량의 변화와 제어된 수위변화를 실선으로 표시하였다. 그림 10(a)와 그림 10(b)는 그림 8과 그림 9에서 사용한 제어기를 출력이 5%일 때 다시 사용한 결과이다. 그림 10(a)는 특정출력에서 설계한 고정된 PI

표 2. 여러 동작조건에서 정상상태 값.

Table 2. The steady state values at various operating conditions.

Power (%)	$W_f = W_s$ (Kg/sec)	T_p (K)	T_f (K)
5	16.66	563.3	318.2
10	33.30	568.1	318.2
15	52.51	569.8	348.6
20	76.65	571.5	399.3
25	102.30	573.2	432.7
30	125.28	574.9	444.2

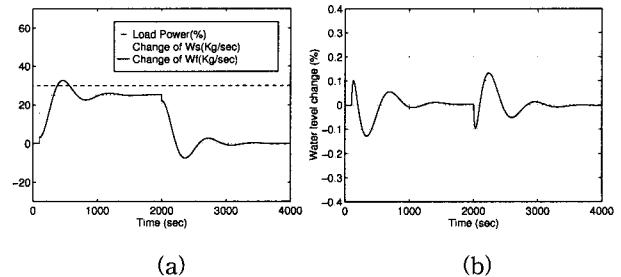


그림 8. 출력이 30%일 때 PI 제어기를 이용한 수위제어.

Fig. 8. Water level control using PI controller (30% power). (a) corresponding changes of feedwater/steam flow rates, (b) result of water level control.

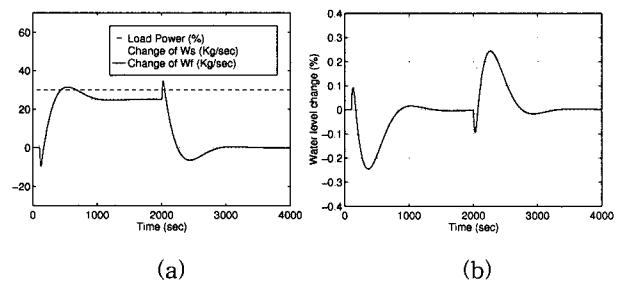


그림 9. 출력이 30%일 때 견실 H_∞ 제어기를 이용한 수위제어.

Fig. 9. Water level control using robust H_∞ controller (30% power). (a) corresponding changes of feedwater/steam flow rates, (b) result of water level control.

제어기로는 부하출력이 변할 경우 안정된 수위제어가 보장되지 않음을 보인다. 그림 11은 출력을 초기 정상치 5%에서 30%로 5%/min의 비율로 증가시킬 경우 30%일 때의 공칭플랜트에 대해 설계한 견실 H_∞ 제어기를 이용한 결과를 나타낸다. 입력조건으로는 100초에서 과도상태가 시작되는 것으로 하였으며 증기유량, 1차측 냉각재온도 및 주급수온도의 변화들은 표 1에서 주어진 5%에 해당하는 값에서 30%에 해당하는 값까지 300초 동안 램프형으로 변화시켰다. 그리고 증기유량의 경우 2500초와 4000초에서 각각 25Kg/sec 계단형 증가/감소로 외란을 가하였다. 그림 11(a)에서 주급수유량의 초기변화 값은 -16.66kg/sec보다 아래로 내려갈 수 없음을 보인다. 이는 초기 부하출력 5%의 정상상태에서 주급수유량은 16.66kg/sec이므로 주급수유량의 변화가 -16.66kg/sec보다 작을 때 실제 주급수유량은 0kg/sec가 됨을 의미한다.

수위에 영향을 미치는 4가지 인자 중 증기유량, 주급수유량의 변화가 주를 이루는다. 그러므로 그림 11(a)에서 실선으로 표시된 주급수유량의 변화는 제어기의 출력으로서 증기유량의 변화를 따라감을 알 수 있다. 그림 11(b)는 설계한 견실 H_∞ 제어기가 부하출력이 변하고 증기유량이 급격히 변할 때도 수위를 안정하게 제어함을 보인다.

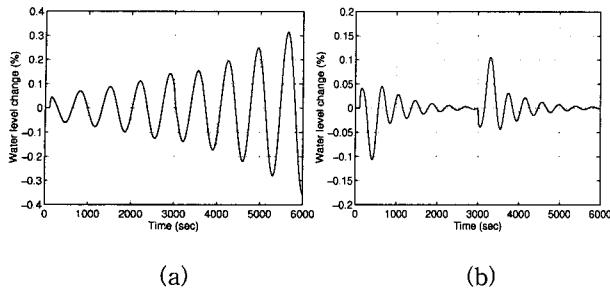


그림 10. 30% 출력에서 설계한 제어기를 5%에서 이용 할 경우.

Fig. 10. Water level control at 5% power using controller designed at 30% power. (a) PI controller, (b) robust H_∞ controller.

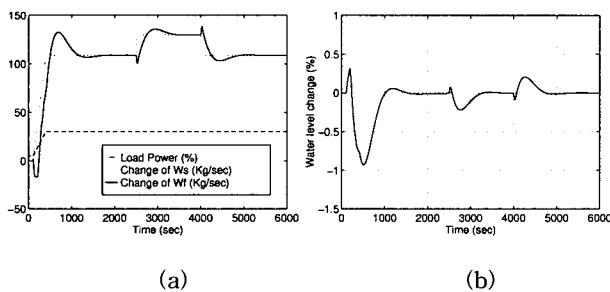


그림 11. 출력변화(5%~30%)시 견실 H_∞ 제어기를 이용한 경우.

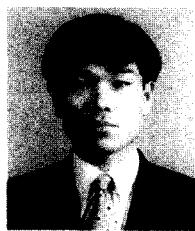
Fig. 11. Water level control using robust H_∞ controller (5% to 30% power up). (a) Power variation and corresponding changes of feedwater/steam flowrates, (b) Result of water level control.

VI. 결론

본 연구에서는 부하출력이 변할 경우, 실제 플랜트와 공정 플랜트 사이에 발생하는 모델오차로 인한 불확실성과 증기유량, 1차측 냉각재온도 및 주급수온도의 변화들로 인한 수위변화 등의 외란이 존재하는 증기발생기의 수위를 제어하기 위해, 모델정합 문제와 견실안정성 여유도 문제를 동시에 고려한 혼합 H_∞ 최적화기법을 이용하여 견실 H_∞ 제어기를 설계하였다. 시뮬레이션을 통해, 특정 부하출력에서 설계한 견실 H_∞ 제어기가 부하출력이 변할 때도 증기유량, 1차측 냉각재온도 및 주급수온도의 변화들에 대해 좋은 성능을 보이며 고전적 PI 제어기보다 견실안정성 면에서 향상됨을 확인하였다.

참고문헌

- [1] E. Irving, et al., "Toward efficient full automation operation of the PWR steam generator with water level adaptive control," *Boiler Dynamics and Control in Nuclear Power Station*, pp. 309-329, 1980.
- [2] M. G. Na and H. C. No, "Design of an adaptive observer-based controller for the water level of steam generators," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 135, pp. 379-394, 1992.
- [3] H. L. Akin and V. Altin, "Rule-based fuzzy logic controller for a PWR-type nuclear power plant," *IEEE Trans. Nuclear Science*, vol. 38, no. 2, pp. 883-890, 1991.
- [4] C. C. Kuan, C. Lin and C. C. Hsu, "Fuzzy logic control of steam generator water level in pressurized water reactors," *Nucluar Technology*, vol. 100, pp. 125-134, 1992.
- [5] 이재기, 최진영, "신경회로망을 이용한 원자력발전소 증기발생기의 모델링," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제4권, 제2호, pp. 551-560, Apr., 1998.
- [6] G. Pellegrinetti, J. Bentsman and K. Poolla, "Control of nonlinear steam generation processes using H_∞ design," *Proc. Amer. Cont. Conf.*, Boston, MA, pp. 1292-1297, 1991.
- [7] G. Pellegrinetti and J. Bentsman, "Control of nonlinear steam generation process with time lags usings an H_∞ design," *Proc. Amer. Cont. Conf.*, Chicago, IL, pp. 1839-1843, 1992.
- [8] R. N. Banavar and U. V. Deshpande, "Robust controller design for a nuclear power plant using H_∞ optimization," *Proc. Conf. Decis. Contr.*, Kobe, Japan, pp. 4474-4479, 1996.
- [9] S. J. Lee, et al., "A study on the development of application techniques to nuclear power plant control systems using a hierarchical control structure," *1st Annual Report, KAERI*, 1994.
- [10] Y. J. Lee and U. C. Lee, "Digitalization of the nuclear steam generator level control system," *J. of the Korean Nuclear Society*, vol. 25, no. 1, pp. 125-135, 1993.
- [11] K. Zhou and J. C. Doyle, *Essentials of Robust Control*, Prentice-Hall, 1998.
- [12] D. W. C. Ho, J. Lam and T. W. K. Chan, "An application of H_∞ design to model-following," *Int. J. Control*, vol. 55, no. 2, pp. 483-509, 1992.
- [13] K. Zhou, J. C. Doyle and K. Glover, *Robust and Optimal Control*, Prentice-Hall, 1996.
- [14] D. McFarlane and K. Glover, *Robust Controller Design using Normalized Coprime Factor Plant Descriptions, Lecture Notes in Control and Information Sciences*, Springer-Verlag, 1990.
- [15] K. Glover and J. C. Doyle, "State-space formulae for all stabilizing controllers that satisfy an H_∞ -norm bound and relations to risk sensitivity," *Systems & Control Letters*, vol. 11, pp. 167-172, 1988.
- [16] D. W. C. Ho, J. Lam and T. W. K. Chan, "Mixed H_∞ optimization with model-matching," *IEE Proc. Control Theory Appl.*, vol. 141, no. 5, pp. 329-340, 1994.
- [17] M. Green and D. J. N. Limebeer, *Linear Robust Control*, Prentice-Hall, 1995.
- [18] 이윤준, "원자력발전소 증기발생기의 저출력 수위조절에 대한 연구," 서울대학교 박사학위 논문, 1991.



서 성 환

1971년 9월 28일생. 1997년 경북대학교 전자공학과 졸업. 1997년-현재 동대학원 석사과정. 관심분야는 견실제어, 견실 H_{∞} 제어응용, 대규모시스템, 산업응용제어.



조희수

1969년 1월 2일생. 1993년 경북대학교 전자공학과 졸업. 포항공과대학 대학원 전자전기공학과 석사(1995). 1998년 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정 수료. 1995년-현재 서울지방중소기업 청 공업연구사. 관심분야는 견실제어, 퍼지제어, 제어응용, 공장자동화.

박홍배

제어·자동화·시스템공학 논문지 제4권, 제2호, 참조.