

P.W.R. 원자로의 부하추종제어

Load Following Control of Pressurized Water Reactor

이 범, 박 영 환*

(Buhm Lee and Young-hwan Park)

Abstract : This paper presents a self-tuning controller for pressurized water reactor (P.W.R.). This self-tuning controller includes two substantial steps, such as parameter identification and control-law building in each cycle. Extended least square algorithm is used for parameter identification, Kalman filter is used for state estimation, and discrete Riccati equation is used for optimal control. Effectiveness of this algorithm is shown through computer simulation and sensitivity analysis.

Keywords : load following control, self-tuning regulator, pressurized water reactor

I. 서론

생산되는 전력의 절반이상을 원자력에서 얻을 정도로, 우리나라는 원자력을 이용한 전력의 생산이 큰 비중을 차지하고 있다. 지금까지 안정성 등을 이유로 원자력발전소는 기저 부하로서만 운전하고 있으나, 향후 원자력의 비중이 증가함에 따라 출력을 조절할 필요가 있다. 특히, 환경문제로 이산화탄소 등의 제약이 필요해 짐에 따라, 이와 같은 필요성은 더욱 중요해 진다 하겠다.

출력을 제어함에 있어 원자력발전소는 상시 동일한 특성을 나타내는 것이 아닌 운전상태에 따라 계통 파라미터가 변화하는 특성을 갖고 있기 때문에 파라미터를 추정해 가면서 제어를 하는 적응제어가 적합하다고 할 수 있다. 적응제어에는 자기동조제어(self-tuning control)[1]와 기준모델적응제어(model reference adaptive control) 등을 들 수 있으나, 부하추종 출력제어에는 자기동조제어가 보다 적합하다고 할 수 있다. 상태공간 자기동조제어는 계통의 파라미터와 상태를 추정한 후, 이들 값을 이용한 제어기를 구성하는 온라인제어로 구성된다.

본 연구에서는 원자로의 계량모델로 외란행렬을 갖는 가압정수형 원자로[2]를 택하였으며, 외란입력으로 2차측 계통의 출력요구와 냉각재유량율을 사용하였다. 원자로계통의 파라미터를 추정함에 있어 확장된 최소사승법[3]을 사용하였으며, 계통의 상태를 추정함에 있어 칼만필터[4]를 사용하였다. 여기서, 칼만이득은 계통파라미터와 계통잡음 및 관측잡음의 변동에 의존하였다. 제어기를 구성함에 있어, 제어의 질과 에너지의 사용을 개선하기 위하여 추정된 상태에 대해 최적제어이론[5]을 적용하였다. 이의 방법으로 한스텝 최적화기법을 적용하고, 행렬부호함수기법을 사용하여 대수 리카치 방정식[6]의 해를 구함으로써 온라인제어를 가능하게 하였다.

제어기가 정상적으로 작동하는지를 시험하기 위하여는 실제 현장에 적용하여야 하나, 가동중인 원자로에 실제로 적용하는 것은 어려운 것이 현재의 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 실제계통을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 작동시키면서

제어기의 작동을 입증하는 것으로 한정하였다. 또한, 가중행렬의 감도해석을 통하여 제어기의 특성을 분석하였다.

II. PWR 자기동조제어기의 개발

1. P.W.R.의 정식화

본 연구에서는 L. F. Miller에 의해 수학적 모델링이 되어 있는 P.W.R. 모델[2]을 사용하였으며, 75[%] 출력을 기준으로 하여 선형화하였다. 여기서, 선형방정식을 차분방정식으로 바꾸어 샘플링주기는 0.2[sec]로 하였다. 또한, 정상 상태의 외부입력은 계통에서 요구하는 부하로 하였다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}} &= \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{G}\mathbf{W} + \mathbf{B}\mathbf{U} \\ \mathbf{Y} &= \mathbf{C}\mathbf{X} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

$$\mathbf{X} = [\delta T_f \quad \delta T_c \quad \delta T_i \quad \delta Z \quad \delta P_r \quad \delta C]$$

$$\mathbf{W} = [\delta W \quad \delta P_s]$$

$$\mathbf{U} = [\delta U]$$

A, G, B, C: 파라미터 행렬

$$T_f \quad : \text{평균 핵연료온도} [^\circ\text{F}]$$

$$T_c \quad : \text{평균 냉각재온도} [^\circ\text{F}]$$

$$T_i \quad : \text{평균 냉각재입구온도} [^\circ\text{F}]$$

$$Z \quad : \text{제어봉 위치}$$

$$P_r \quad : \text{원자로 1차측 출력} [\%] (\text{Normalized})$$

$$C \quad : \text{선행핵농도에 비례한 변수}$$

$$W \quad : \text{냉각재유량율} [\%] (\text{Normalized})$$

$$P_s \quad : \text{원자로 2차측 출력} [\%] (\text{Normalized})$$

$$U \quad : \text{제어봉 위치 입력}$$

2. 자기동조제어기의 개발

2.1 선형화 및 이산화 제어계통

정상상태에서 선형화된 제어계통은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{G}\mathbf{W}(t) + \mathbf{B}\mathbf{U}(t) + \mathbf{w}(t) \\ \mathbf{Y}(t) &= \mathbf{C}\mathbf{X}(t) + \mathbf{v}(t) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,

$$\mathbf{w}(t), \mathbf{v}(t) : t \text{ 시간대의 백색잡음벡터}$$

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2007. 11. 27., 채택확정 : 2008. 1. 16.

이 범 : 전남대학교(buhmlee@chonnam.ac.kr)

박영환 : 충주대학교(pyh@cju.ac.kr)

(2)를 이산화하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(k+1) &= \mathbf{A}\mathbf{X}(k) + \mathbf{G}\mathbf{W}(k) + \mathbf{B}\mathbf{U}(k) + \mathbf{w}(k) \\ \mathbf{Y}(k) &= \mathbf{C}\mathbf{X}(k) + \mathbf{v}(k) \end{aligned} \quad (3)$$

(3)으로부터 칼만필터[4]를 구성하고, 가 관측 블럭(observable block companion form)으로 변환하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{X}}_o(k+1) &= \mathbf{A}_o \hat{\mathbf{X}}_o(k) + \mathbf{G}_o \mathbf{W}(k) + \mathbf{B}_o \mathbf{U}(k) + \mathbf{K}_o(k) \mathbf{e}(k) \\ \mathbf{Y}(k) &= \mathbf{C}_o \hat{\mathbf{X}}_o(k) + \mathbf{e}(k) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,

$$\mathbf{A}_o = \begin{bmatrix} -A_{o1} & I_p & 0_p & \cdots & 0_p \\ -A_{o2} & 0_p & I_p & \cdots & 0_p \\ \vdots & & & & \\ -A_{or-1} & 0_p & 0_p & \cdots & I_p \\ -A_{or} & 0_p & 0_p & \cdots & 0_p \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G}_o = [G_{o1} \ G_{o2} \ \cdots \ G_{or}]^T$$

$$\mathbf{B}_o = [B_{o1} \ B_{o2} \ \cdots \ B_{or}]^T$$

$$\mathbf{K}_o = [K_{o1} \ K_{o2} \ \cdots \ K_{or}]^T$$

$$\mathbf{C}_o = [I_p \ 0_p \ \cdots \ 0_p]$$

$\hat{\mathbf{X}}_o(k)$: $\mathbf{X}_o(k)$ 의 추정 벡터

$\mathbf{K}_o(k)$: 칼만 이득

$\mathbf{e}(k)$: 칼만필터출력과 계통출력과의 오차

(4)로부터 입력-출력의 관계를 정리하면, 다음의 다변수 ARMAX 모델로 나타낼 수 있으며, 이 식을 사용하여 파라미터 행렬 및 상태를 추정할 수 있다.

$$\mathbf{A}_o Z^{-1} \mathbf{Y}(k) = \mathbf{G}_o Z^{-1} \mathbf{W}(k) + \mathbf{B}_o Z^{-1} \mathbf{U}(k) + \mathbf{D}_o Z^{-1} \mathbf{e}(k) \quad (5)$$

여기서,

$$\mathbf{A}_o Z^{-1} = \mathbf{I}_p + A_{o1} Z^{-1} + A_{o2} Z^{-2} + \cdots + A_{or} Z^{-r}$$

$$\mathbf{G}_o Z^{-1} = G_{o1} Z^{-1} + G_{o2} Z^{-2} + \cdots + G_{or} Z^{-r}$$

$$\mathbf{B}_o Z^{-1} = B_{o1} Z^{-1} + B_{o2} Z^{-2} + \cdots + B_{or} Z^{-r}$$

$$\mathbf{D}_o Z^{-1} = \mathbf{I}_p + D_{o1} Z^{-1} + D_{o2} Z^{-2} + \cdots + D_{or} Z^{-r}$$

$$D_{oi} = A_{oi} + K_{oi}$$

2.2 파라미터 및 상태의 추정

(5)로부터 파라미터를 추정하기 위하여, 확장최소자승법[3]을 사용하였다. 우선, (5)를 다음의 ARMAX 모델로 표현하였다.

$$\mathbf{Y}(k) = \hat{\boldsymbol{\theta}}^T(k-1) \boldsymbol{\varphi}(k) + \boldsymbol{\varepsilon}(k) \quad (6)$$

여기서,

$$\boldsymbol{\theta}^T(k-1) = [A_{o1}, \dots, A_{or}, G_{o1}, \dots, G_{or}, B_{o1}, \dots, B_{or}, D_{o1}, \dots, D_{or}]$$

$$\boldsymbol{\varphi}(k) = [-Y_1(k-1), \dots, -Y_p(k-1), -Y_1(k-2), \dots, -Y_p(k-r),$$

$$W_1(k-1), \dots, W_q(k-1), W_1(k-2), \dots, W_q(k-r),$$

$$U_1(k-1), \dots, U_m(k-1), U_1(k-2), \dots, U_m(k-r),$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_1(k-1), \dots, \boldsymbol{\varepsilon}_p(k-1), \boldsymbol{\varepsilon}_1(k-2), \dots, \boldsymbol{\varepsilon}_p(k-r)]^T$$

$\boldsymbol{\varepsilon}(k)$: 추정 파라미터에 의한 출력과 실제출력과의 오차

(6)으로부터 파라미터 추정 알고리즘은 다음과 같다.

$$\boldsymbol{\varepsilon}(k) = \mathbf{Y}(k) - \hat{\boldsymbol{\theta}}^T(k-1) \boldsymbol{\varphi}(k) \quad (7)$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(k) = \hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1) + \boldsymbol{\gamma}(k) \boldsymbol{\varepsilon}^T(k) \quad (8)$$

여기서,

$$\boldsymbol{\gamma}(k) = \{\mathbf{T}(k-1) \boldsymbol{\varphi}(k)\} / \{\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varphi}^T(k) \mathbf{T}(k-1) \boldsymbol{\varphi}(k)\}$$

$$\mathbf{T}(k) = \boldsymbol{\beta}^{-1} \{\mathbf{T}(k-1) - \boldsymbol{\gamma}(k) \boldsymbol{\varphi}^T(k) \mathbf{T}(k-1)\}$$

(7) 및 (8)로부터 파라미터행렬 및 추정된 칼만이득을 구할 수 있으며, (4)로부터 다음과 같이 상태를 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{X}}_o(k+1) &= \hat{\mathbf{A}}_o \hat{\mathbf{X}}_o(k) + \hat{\mathbf{G}}_o \mathbf{W}(k) + \hat{\mathbf{B}}_o \mathbf{U}(k) \\ &\quad + \hat{\mathbf{K}}_o(k) \{\mathbf{Y}(k) - \mathbf{C}_o \hat{\mathbf{X}}_o(k)\} \end{aligned} \quad (9)$$

2.3 준최적 자기동조제어기

(4)에서 잡음을 제외한 계통을 고려하고, 앞서 구한 추정 파라미터와 추정 상태를 사용하여 제어계통을 구성한다. 이를 위하여는 평가지표가 필요한데, 이 평가지표는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{J} = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^m \{(\hat{\mathbf{X}}_o(k) - \mathbf{X}_d)^T \mathbf{Q} (\hat{\mathbf{X}}_o(k) - \mathbf{X}_d) + \mathbf{U}^T(k) \mathbf{R} \mathbf{U}(k)\} \quad (10)$$

여기서,

\mathbf{X}_d : 상태변수의 목표치

$\mathbf{Q} \geq 0, \mathbf{R} \geq 0$: 하중행렬

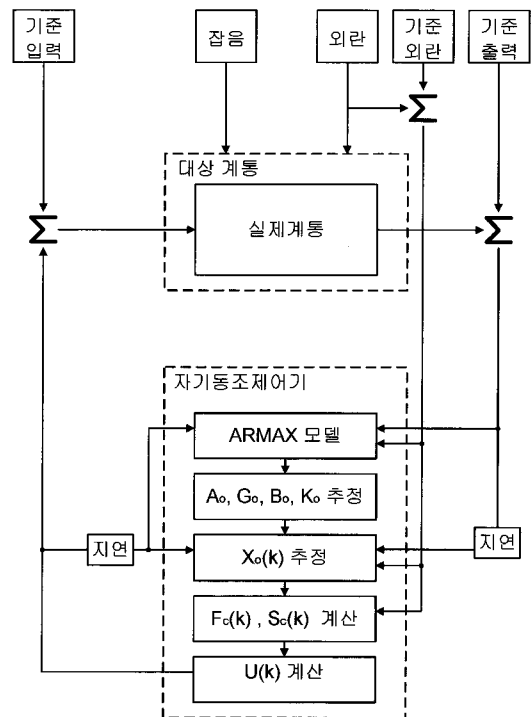


그림 1. 자기동조제어기의 블록선도.
Fig. 1. Block diagram of self-tuning controller.

(10)을 최소화하는 제어입력은 다음과 같다.

$$U(k) = -F_c(k) \hat{X}_o(k) - S_c(k) \quad (11)$$

여기서,

$$\begin{aligned} F_c(k) &= R^{-1} \hat{B}_o^T (\hat{A}_o^T)^{-1} \{P(k) - Q\} \\ S_c(k) &= R^{-1} \hat{B}_o^T (\hat{A}_o^T)^{-1} \{S(k) + Q X_d\} \\ P(k) &= Q + \hat{A}_o^T [P(k-1)^{-1} + \hat{B}_o R^{-1} \hat{B}_o^T]^{-1} \hat{A}_o \\ S(k) &= [I + \hat{A}_o^T P(k) \{I + \hat{B}_o R^{-1} \hat{B}_o^T P(k)\}^{-1} \hat{B}_o R^{-1} \hat{B}_o^T - \hat{A}_o^T]^{-1} \\ &\quad * [-QX_d + \hat{A}_o^T P(k) \{I + \hat{B}_o R^{-1} \hat{B}_o^T P(k)\}^{-1} \hat{G}_o W(k)] \end{aligned}$$

본 알고리즘의 블록선도를 그림 1에 나타내었다.

III. 제어기 시뮬레이션

P.W.R 모델을 대상으로 한 제어기의 특성을 알아보기 위하여 본 연구에서는 (1)의 정식화된 계통을 그림 1의 실제계통으로, 본 연구에서 개발한 제어기를 그림 1의 자기동조제어기로 구성하고 시뮬레이션 하였다. 또한 본 연구에서 사용한 부하를 그림 2에 나타내었다.

그림 2의 부하는 0.75[pu]로 운전되고 있으며, 0.85[pu]까지 출력을 증가시킨 다음, 다시 0.7[pu]로 낮추는 부하패턴을 갖고 있다.

1. 제어기의 특성분석

본 연구에서는 파라미터 추정과 관련한 가중행렬을 (12)에,

자기동조제어기와 관련한 가중행렬을 (13)에 나타내었다. (13)의 가중행렬은 제어봉과 원자로출력의 제어를 치중하기 위하여, 해당 부분의 가중치를 상대적으로 크게 한 것이다.

$$T(0) = \text{diag}[1000, 1000, \dots, 1000] \quad (12)$$

$$Q = \text{diag}[0.1, 0.1, 0.5, 5.0, 5.0, 0.1] \quad (13)$$

$$R = 50$$

상기 부하와 가중치를 사용하여 부하추종 출력제어를 한 결과중, 제어봉의 제어상태를 그림 3에, 원자로출력의 제어상태를 그림 4에 나타내었다.

그림 3 및 그림 4에서 제어봉의 위치 및 원자로출력은 약간의 오버슈트를 나타내며 부하추종을 하고 있음을 알 수 있다. 여기서, 제어봉은 비교적 출력에 대응되는 위치를 바로 추종하는 반면, 원자로출력은 상대적으로 오버슈트가 큰 편임을 알 수 있다. 오버슈트는 가중치와 밀접한 관계를 갖고 있기 때문에, 본 연구에서 사용한 상대적으로 큰 가중치 때문으로 추정된다. 또한, 파라미터의 추정상태를 알아보기 위하여 그림 5와 그림 6에 파라미터의 추정을 살펴보았다. 파라미터는 A행렬이 36개, G 행렬이 12개, B 행렬이 6개이나, 본 연구에서는 편의상 A행렬 중 3개, G 행렬 중 1개, B 행렬 중 1개 만을 나타내었다.

그림 5 및 그림 6에서 반복계산이 됨에 따라 파라미터는 일정 값에 수렴하고 있음을 알 수 있다. 이로서, 본 제어기는

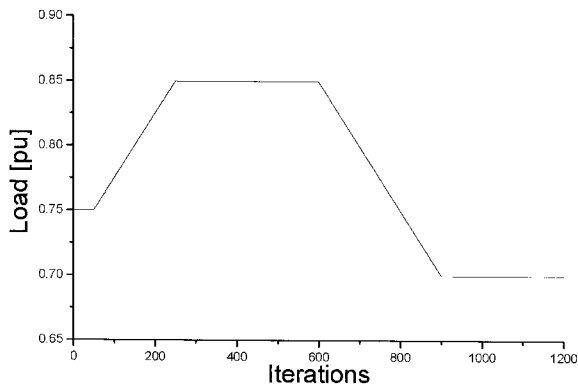


그림 2. P.W.R.의 부하.

Fig. 2. Load of P.W.R.

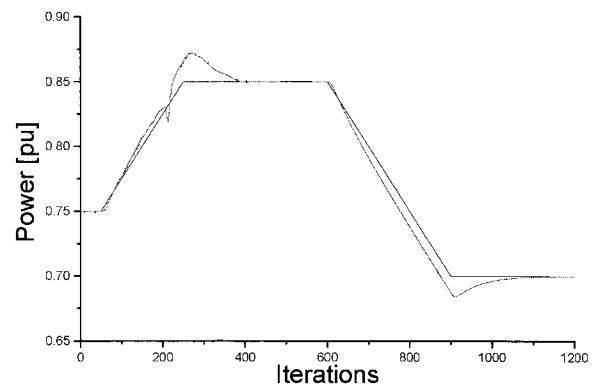


그림 4. 원자로출력의 부하추종.

Fig. 4. Load following of reactor power.

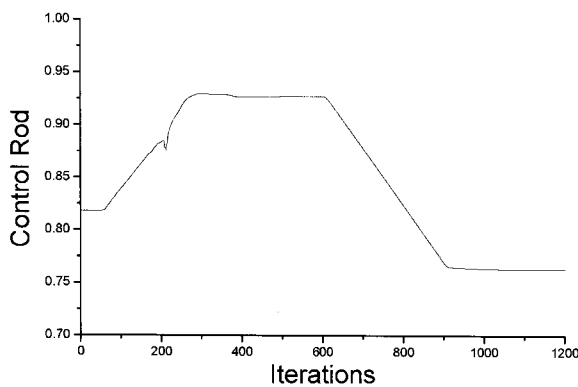


그림 3. 제어봉의 부하추종.

Fig. 3. Load following of control rod.

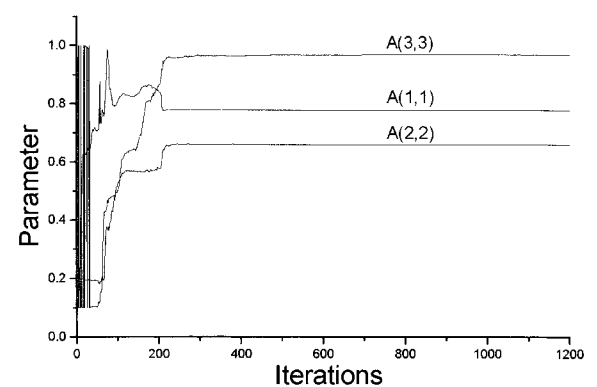


그림 5. 파라미터의 수렴(A 행렬, 일부).

Fig. 5. Convergence of parameter(A matrix, part).

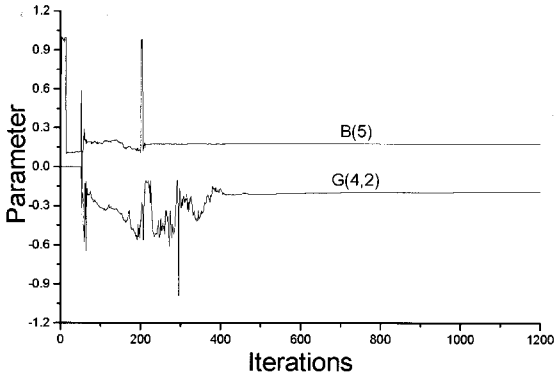


그림 6. 파라미터의 수렴(B,G 행렬, 일부).
Fig. 6. Convergence of parameter(B, G matrix, part).

정상적으로 수렴하고 있으며, 정상적으로 부하추종을 하고 있음을 알 수 있다.

2. 제어기 감도해석

제어특성은 가중치에 크게 영향을 받는다. 따라서, 본 연구에서는 가중치를 바꾸어가며, 제어기의 특성을 살펴보았다. 이를 위하여 우선 원자로출력과 관계가 있는 5번째 가중치를 바꾸어가며 시뮬레이션 한 결과를 그림 7에 나타내었다.

그림 7에서 Q의 5번째 가중치를 0.1-10000.0까지 6가지로 변경해 가며 부하추종특성을 살펴본 결과, 모두에서 부하추종은 비슷하게 이루어지고 있어 5번째 가중치의 크기는 영향이 크지 않음을 알 수 있었다.

또한, 제어봉의 위치와 관계가 있는 4번째 가중치를 바꾸어가며 시뮬레이션 한 결과를 그림 8에 나타내었다.

그림 8에서 Q의 4번째 가중치를 0.1-10000.0까지 6가지로

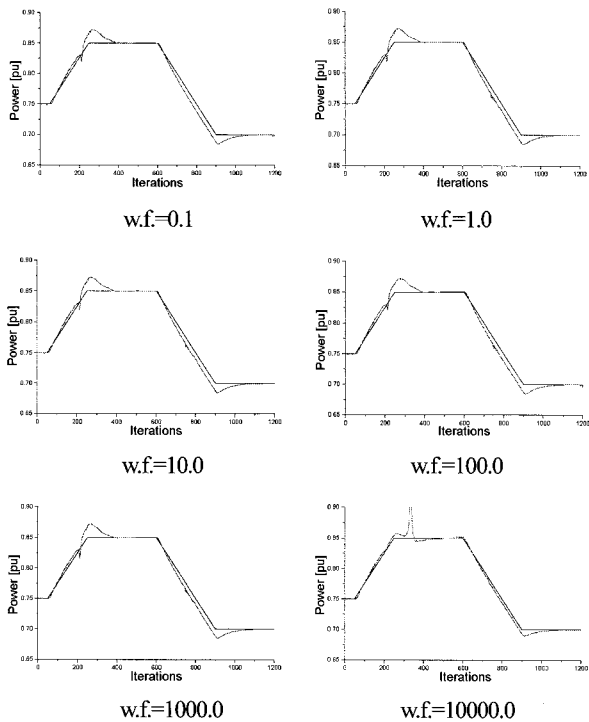


그림 7. 부하추종 (5번째 가중치).
Fig. 7. Load following (5th weighting factor).

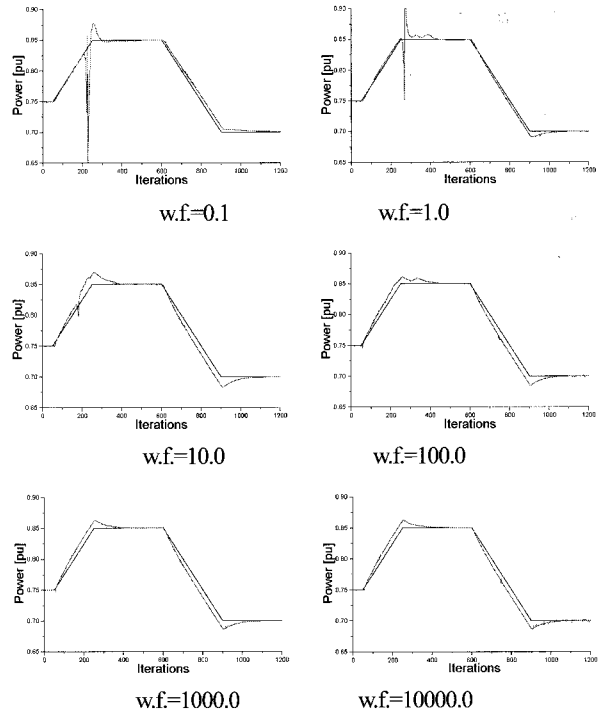


그림 8. 부하추종 (4번째 가중치).
Fig. 8. Load following (4th weighting factor).

변경해 가며 부하추종특성을 살펴본 결과, 5번째 가중치와는 달리 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있었다. 즉, 본 제어기의 제어봉의 위치와 관련이 있는 가중치를 크게 하면 보다 빠른 부하추종을 작은 오버슈트로 할 수 있음을 알 수 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 시변, 비선형계통인 P.W.R의 부하추종제어를 실현할 수 있는 자기동조제어기를 개발하였다. 본 연구에서 얻은 중요한 결론은 다음과 같다.

1. 주어진 계통에 대하여 이산화 및 선형화를 시행하고, 칼만필터를 사용한 ARMAX모델을 구성하였다. 이 ARMAX모델로부터 최소자승법에 의한 파라미터추정 및 칼만필터를 사용한 상태추정을 하고, 계산된 파라미터 및 상태 추정치로부터 제어기를 구성하는 상태공간 자기동조제어기를 개발하였다.
2. P.W.R의 계량모델을 사용하여 시뮬레이션 함으로써 본 자기동조제어기가 파라미터 및 상태를 추정하고 정상적인 제어가 이루어 짐을 보였다.
3. 가중행렬중 제어봉의 위치와 관련된 가중치와 원자로출력과 관련된 가중치를 수정해 가면서 감도해석을 한 결과, 원자로출력과 관련된 가중치에는 둔감한 반면, 제어봉의 위치와 관련된 가중치에는 민감하게 반응함을 알 수 있었다.

참고문헌

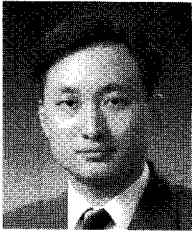
[1] K. J. Astrom, "Theory and applications of adaptive control-A survey," Automatica, vol. 19, no. 5, pp. 477-486, 1983.
[2] L. F. Miller et al., "Nuclear reactor control systems with sensor failure," Nuclear Technology, vol. 36, pp. 93-195, 1977.
[3] W. H. Press et al., "Numerical recipes in C," Cambridge

University Press, 1988.

- [4] Y. T. Tsay and L. S. Shieh, "State-space approach for self-tuning feedback control with pole assignment," *IEE Proc.*, vol. 128, no. 3, pp. 93-101, 1981.

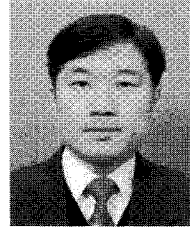
- [5] D. E. Kirk, *Optimal Control Theory: an Introduction*, Prentice-Hall, 1970.

- [6] L. S. Shieh, C. T. Wang, and Y. T. Tsay, "Fast suboptimal state-space self-tuner for linear stochastic multivariable systems," *IEE proc.*, vol. 130, no. 4, pp. 143-154, 1983.



이 범

1995년 고려대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 전남대학교 전기 전자통신컴퓨터공학부 교수. 관심분야는 자동제어, 전기품질.



박영환

1998년 고려대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 충주대학교 정보 제어공학과 부교수. 관심분야는 자동 제어.