

증기발생기 수위제어를 위한 퍼지제어기의 Self-Tuning

A Self-Tuning of a Fuzzy Logic Controller for Steam Generator Water Level

나 난 주*, 정 철 환**, 권 기 춘**

Nan-Ju Na*, Chul-Hwan Jung**, Kee-Choon Kwon**

요 약

원전 증기발생기의 수위제어를 퍼지제어기로 구성하는 경우 증기발생기의 단독운전이 아닌 전체발전소의 가동중에 소속함수 조정이 이루어져야 하는 제약환경을 고려할 때 많은 반복실행횟수를 필요로 하는 임의적인 시행착오방법이나 일반화되어 있지 않은 복잡한 방법보다는 보다 간단명료하고 예측가능한 조정경로를 통해 소속함수를 조정할 필요가 있다. 여기에서는 그 방안으로서 프로세스 제어응답의 최대초과량 상승시간의 함으로서 평가함수를 도입하고 descent method를 이용하여 제어응답의 결과로 얻는 평가함수의 최소점을 따라 소속함수를 조정해가는 방법을 제시하였다.

ABSTRACT

The simple and practical method for tuning the fuzzy logic controller of the steam generator water level is proposed considering its environment. The method uses the evaluation function and the descent method for tuning the membership function of the FLC. The evaluation function is made of the sum of the performance measures, the rising time and the overshoot of the step response, and the membership function of the flow error of the steam generator is tuned at its minimized point, the area of the optimum performance of the controller.

I. 서 론

증기발생기의 수위제어는 원자력발전소 불시정지 또는 초기운전시의 불안정성으로 인해 높은 관심의 대상이 되어 왔으며 기존의 PI 제어기법 대신 각종 현대제어기법을 적용한 수위제어연구가 활발히 진행되어 왔다. 그러나 증기발생기는 비선형 특성이 크게 내재한 고차시스템으로서 모델링의 어려움으로 인해 근래에는 수학적모델에 근거한 제어기법보다는 전문가의 제어규칙에 의존하는 퍼지제어기법이 그 적용성에서 보다 인정받고 있으며 이미 일본의 후겐 원자력발전소에서 증기발생기의 수위제어에 퍼지제어를 적용한 제어시스템을 설치, 운전중에 있다.^[5,6]

그런데 퍼지제어기는 모델기반의 제어기와 같은 수식전개에 표현되지 않기 때문에 튜닝과정에서 소속함수의 임의적인 변조로 반복적인 시행착오방법에 의해 요구되는 제어성능을 얻고 있으며, 이것은 대개 시간소모작업이 된다. 최근에는 자동화입장에서 퍼지제어기 역시 튜닝의 체계적이고 타당한 방법도입의 필요성에 따라 제어규칙

*한국원자력연구소, 정회원

**한국원자력연구소

의 자동생성이나 소속함수의 자동조정에 관한 연구가 관심의 주류를 이루고 있고, 개념상 여러가지 방법으로 시도되어 왔다. 주된 내용은 신경망 또는 유전 알고리즘등의 다른 인공지능기법을 결합하여 구성하는 것으로 그 적용상의 어려움 등으로 인하여 아직 일반화된 방법이 제시되었다고 보기는 어렵다. 특히 증기발생기의 경우 구현된 제어시스템을 실제로 설치, 운전하기 위해 초기조정을 하는데 있어서 증기발생기 단독운전이 아닌 전 발전소 계통 운전중에 조정되어야 한다는 실험환경적 제약이 있으므로 많은 실행횟수를 필요로 하는 방법은 가능한 한 피해야 하며 인자의 조정방향을 예측할 수 있는 것이 바람직하다.

본 논문에서는 간단하면서도 실질적인 방법으로서 증기발생기 수위제어시스템의 특성 및 튜닝환경에 적용가능한 퍼지제어기 튜닝방법을 모색하였다. 여기에서는 Daugherty등이 제안한 제어성능평가에 의한 self-tuning 방법^[1]과 Noruma등이 제안한 descent method에 의한 소속함수 학습방법^[2]을 토대로 제어시스템의 성능평가함수를 새로 설정하고 gradient descent method에 의해 평가함수의 최소점을 따라 소속함수를 튜닝하는 알고리즘을 구성하였다.

제안된 튜닝알고리즘을 적용한 소속함수의 튜닝실험은 기 구성된, 증기발생기 수위제어를 위한 퍼지제어기^[3]를 사용하여 한국원자력연구소에 설치된 교육훈련용 원전 시뮬레이터에서 수행하였다. 시뮬레이터의 원자로 동특성은 SMABRE 코드를 사용하여 구현되었다.

II. 소속함수의 self-tuning

Daugherty등은 요구되는 성능치를 설정하고 프로세스로부터 계산된 성능평가인자들의 퍼지추론에 의해 제어기 입력 변수의 소속함수를 조정하는 방법을 제시하고 있다.^[1] 즉

IF performance measure is X_1 , THEN Δs_e is Y_1

IF performance measure is X_2 , THEN Δs_{de} is Y_2

와 같이 제어규칙을 설정하고 이로부터 추론된 양(Δs_e , Δs_{de})만큼 해당변수의 소속함수를 변경하도록 한다. performance measure는 프로세스 계단응답인 최대초과량, 상승시간 및 진폭이 설정성능치에서 벗어나는 정도를 사용하며 Δs_e , Δs_{de} 는 퍼지입력변수의 변동분이다. 그러나 프로세스가 알려지지 않은 상태에서 제어성능상 상충관계를 갖는 최대초과량 및 상승시간의 설정량과 제어결과로 나오는 성능측정시간의 차를 보상하고 체계적인 튜닝 경로를 찾는 것은 곤란하게 여겨진다. 또한 프로세스의 제어와 별개의 추론과정이 부가되어야 하고 관계변수의 튜닝문제도 다시 고려되어야 한다.

Descent method에 의한 퍼지추론규칙 학습방법을 다루고 있는 [2]에서는 요구되는 출력과 추론결과로 얻어지는 출력간의 추론오차가 이 Descent method에 의해 각 소속함수에 대해 최소가 되도록 하고 있다.

Descent method^[4]는 벡터 Z 에 관한 함수 $E(Z)$ 가 있을 때 함수 $E(Z)$ 를 최소화시키는 Z 를 찾는 방법으로, 이때 Z 는 $E(Z)$ 를 감소시키는 방향으로 식 (1)에 의해 학습된다. 학습회차가 증가함에 따라서 $E(Z)$ 는 지역최소점으로 수렴하게 된다.

$$z_i(t+1) = z_i(t) - K \frac{\partial E(Z)}{\partial z_i} \quad (1)$$

$i=1, \dots, p$

t : 학습반복 회차

Noruma등은 식(2)와 같이 요구되는 출력 y^r 과 퍼지추론에 의한 출력 y 간의 오차함수를 지정하고 이것이 각 소속함수에 대한 식(2)의 방법으로 최소화되도록 하는 방법을 제시하였다.^[2] 즉

$$E = \frac{(y - y^r)^2}{2} \quad (2)$$

$$m_{i,j}(t+1) = m_{i,j}(t) - K_m \frac{\partial E}{\partial a_{ij}} \quad (3)$$

$m_{i,j}$: 소속함수의 중심값 또는 폭

본 논문에서 제안하는 튜닝 알고리즘은 첫째 소속함수 튜닝에 적용하기 위해 앞의 오차량 대신에 제어응답의 제어성능 치인 최대초과량과 상승시간을 더한 값으로 평가함수를 도입하여 소속함수 튜닝에 사용하는 것이다. 즉 평가함수 M 은 다음과 같이

$$M = k_1 * OV + k_2 * Tr \quad (4)$$

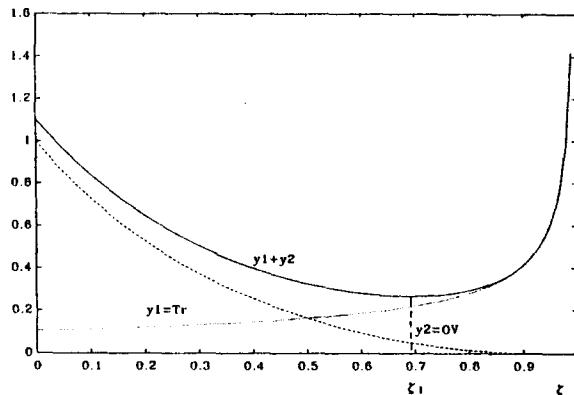
OV : 최대초과량

Tr : 상승시간

k_i : 임의의 상수($i = 1, 2$)

로 둔다면 제어성능은 OV 와 Tr 이 모두 가능한 한 작은 것이 바람직하고 따라서 M 은 보다 작은 값이 요구된다. 그러나 시스템응답이 빠를 때 상승시간이 줄어드는 대신 최대초과량이 보다 커져서 시스템 불안정성을 증가시키고 최대초과량을 감소시키는 방향으로 제어할 때 상승시간이 길어져서 시스템응답이 느려지는, trade-off관계에 있는 두 인자의 상반된 응답특성으로 인해 도입된 평가함수 M 은 단조증가 또는 단조감소 함수가 아닌 최소점을 갖는 함수가 된다.

〈그림 1〉은 자연주파수 15 Hz인 2차시스템의 감쇄비에 대한 OV 및 Tr 을 나타낸 것이다. y_1 은 감쇄비에 대한 상승시간, y_2 는 감쇄비에 대한 최대초과량, $y_1 + y_2$ 는 $k_1 = k_2 = 1$ 일 때의 감쇄비에 대한 M 의 관계를 보여준다. 감쇄비가 커질수록 상승시간은 길어지고 감쇄비가 작을수록 최대초과량이 커지므로 M 은 $\zeta = \zeta_1$ 일 때 최소가 된다. k_i 는 시스템의 제어특성에 따라 허용 최대초과량과 상승시간에 비중을 달리 두기 위함이다. 이때 M 을 최소로 하는 ζ 의 값도 달라질 것이다.



〈그림 1〉 2차시스템의 감쇄비 대 평가함수의 관계

둘째는 소속함수에 대한 이 평가함수 M 의 기울기 곡면을 따라 평가함수의 최소점으로 소속함수를 조정해가는 것이다. 이것을 [3]에서 기술된 증기발생기 수위제어를 위한 퍼지제어기 튜닝에 적용할 수 있다. [3]에서의 퍼지 수위제어기를 간략히 서술하면 다음과 같다.

증기발생기의 수위는 수위설정치에 대한 측정수위의 오차와 증기유량에 대한 급수유량의 차로써 급수밸브 개

도량을 조절함으로써 제어된다. 즉 퍼지제어기에 적용되는 규칙은

IF LE is A and FE is B, THEN ΔU is C.

LE(수위오차) = 수위설정치 - 측정수위

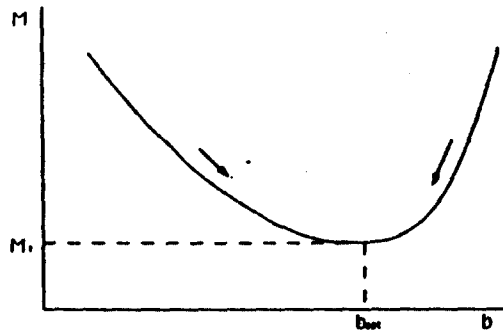
FE(유량차) = 증기유량 - 급수유량

ΔU : 밸브개도 제어량

이때 이때 LE의 소속함수 폭은 운전시 허용되는 수위변동폭으로, ΔU 는 밸브 stroke시간으로 즉 샘플링시간이내의 밸브작동 한계로 제한되며 FE는 소속함수의 조정폭이 크고 소속함수의 폭에 따라 직접 프로세스 응답속도에 영향을 미치는 요소이다. 따라서 여기에서는 LE 및 ΔU 의 소속함수는 고정시키고 FE의 소속함수 폭을 조정대상으로 하여 알고리즘을 구성, 실행하였다.

유량차 소속함수의 폭을 b 라 할 때 b 를 크게 할 경우 시스템응답이 빨라져서 상승시간 Tr 의 감소와 최대초과량 OV 의 증가를 가져오고 b 를 작게 할 경우 Tr 의 증가 및 OV 의 감소를 보이며^[3] b 는 시스템의 응답에 대해 감쇄인자 ζ 와 반대되는 특성을 나타내지만 앞에서 정의된 평가함수 M 에 대해서는 같은 특성을 가진다. 그러므로 언어적 표현과 추론방법으로 맺어지는 b 와 프로세스출력의 관계가 수학적으로 기술될 수는 없지만 <그림 2>에서와 같이 b 대 M 간의 개념적인 관계그래프는 설정할 수 있으며 역시 M 을 최소로 하는 b 를 취할 수 있다.

튜닝 알고리즘은 이러한 관계특성으로부터 임의의 b 에서 출발하여 M 의 기울기를 따라 M 이 감소하는 쪽으로 b 를 수정해감으로써 최종적으로는 M 이 최소로 되는 b_{opt} 를 얻는 것이다.



<그림 2> 유량차 소속함수 b 와 평가함수 M 의 관계

임의의 b 에 대한 수위 프로세스의 계단응답을 얻은 후 다음의 식(5)와 같이 b 를 수정한다.

$$b(n+1) = b(n) - H * \frac{\Delta M}{\Delta b} \quad (5)$$

$$\Delta M = M(n) - M(n-1)$$

$$\Delta b = b(n) - b(n-1)$$

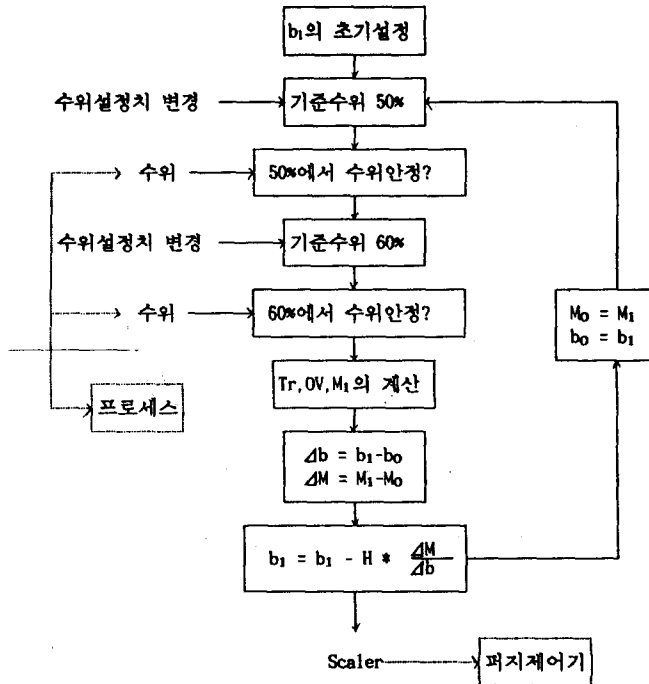
n : 계단응답 반복실행회차

H : 수정율 또는 학습율

b 의 변동분 Δb 에 대한 평가함수 M 의 변동분 ΔM 을 b 의 수정항목으로 사용하며 M 이 M_1 에 도달할 때까지 b 는 계속 수정된다.

III. simulation 및 결과검토

수위가 50%로 유지되는 증기발생기의 수위설정치를 50%에서 60%로 변경 설정하여 수위프로세스의 계단응답을 얻은 후 60%에서 50%로 설정치를 변경하여 50%에서 수위가 안정된 다음 수정된 b의 값을 적용하여 다시 계단응답을 얻는 과정을 반복하였다. 이 과정에서 매번의 계단응답으로부터 식(5)의 평가함수를 계산하고 다음 프로세스에 적용될 b의 값을 얻는 것이다. 운전중 값이 자동으로 조정될 수 있도록 <그림 3>에서와 같은 알고리즘을 세우고 b의 값의 변동이 없거나 어느 한계치 이내에 들게 되면 조정을 끝내도록 하였다. 초기수행시에는 b의 튜닝에 필요한 앞서 실행된 회차의 평가함수등이 없으므로 초기 b에 의한 수행결과가 최대초과량이 있으면 b를 다음회차에서 감소시키고 최대초과량이 없으면 b를 다음회차에서 증가시키는 방법을 사용하였다. 이는 초기 수행시에 최대초과량에 따라 불안정성을 줄이거나 응답이 빨라지도록 b의 증감방향을 잡아주기 위함이며 이 실험에서는 b의 초기값으로 8을 주고 증감의 양은 b의 초기값의 10%로 하였다.



<그림 3> 튜닝알고리즘의 흐름도

<표 1>은 평가함수의 파라미터가 $k_1=1$ 및 $k_2=1$ 일 때 반복실행에 따라 수정된 b의 값과 제어응답 성능치를 나타낸 것이며 <그림 4>는 이 결과를 b와 평가함수 M의 관계로 나타낸 그림이다. <그림 4>에서 보는 바와 같이 b의 값이 25 근처에서 M이 최소로 되고 <표 1>로부터 실행회차(n)이 증가함에 따라 b가 이 값에 가까이 감을 볼 수 있다. <표 2>는 평가함수의 파라미터가 $k_1=5$ 및 $k_2=1$ 인 경우에 대한 b의 튜닝결과를 나타내고 <그림 5>는 이에 대한 b와 M의 관계를 표시한 것인데 첫번째 실험의 경우보다 b가 작은 값인 20 근처에서 M이 최소로 되며 이 값을 중심으로 b가 안정되어감을 보이고 있다. 평가함수의 파라미터 변동영향을 살펴보기 위해 M이 최소일

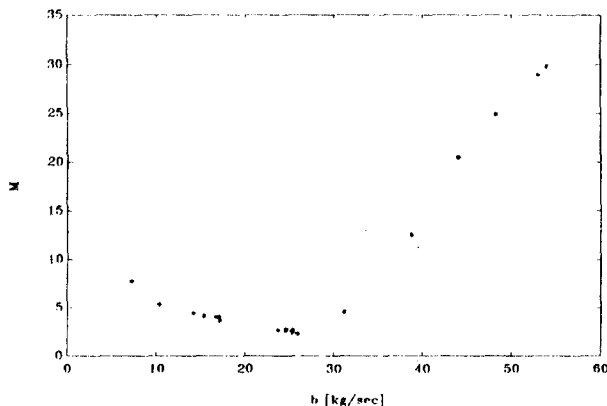
때를 비교하여 보면, <표 1>의 경우 15회차에서 M 이 최소가 되어 그 때의 최대초과량은 0.39989%이고 <표 2>의 경우 19회차에서 M 이 최소가 되며 그 때의 최대초과량은 0.06098%로서 <표 1>의 경우보다 최대초과량이 줄어든 한편 상승시간은 길어졌음을 볼 수 있다. 즉 k_1 을 크게 했을 때 b 는 상승시간보다는 최대초과량이 감소하는 지점으로 조정되어감을 알 수 있다. 이것은 예측되는 결과로서 성능요건의 비중에 따라 k_1 또는 k_2 를 설정함으로써 요구되는 성능을 만족시키도록 소속함수가 조정될 수 있음을 말한다. 만일 성능요건을 최대초과량보다 상승시간에 더 비중을 둔다면 k_2 를 크게 할 것이 요구된다. 또 하나의 변동요인으로 수정을 H 는 튜닝속도를 결정하며 H 를 작게 할 경우 소속함수의 튜닝과정에서 보다 서서히 평가함수의 최소점에 진입할 것이지만 튜닝되는 소속함수의 변동폭은 작아질 것이다. 즉 충분히 작다면 한차례의 진입시도로 최소점에서 안정될 것이다.

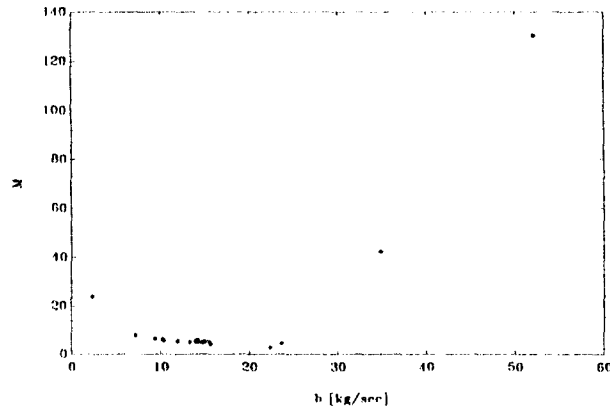
<표 1> $K_1=1, K_2=1, H=5$ 일 때 실행결과

n	OV(%)	Tr(분)	b(kg/s)
1	0.00280	7.69333	7.20000
2	0.01210	5.29333	10.26250
3	0.23377	4.17667	14.14498
4	0.13828	3.95667	15.29759
5	0.31316	3.67667	16.66616
6	0.39619	3.59000	17.05021
7	0.03272	3.57333	17.09757
8	29.18661	1.20000	57.23222
9	28.52815	1.24333	53.89588
10	27.64410	1.25000	52.97403
11	23.56744	1.29000	48.21517
12	19.11163	1.32000	43.97396
13	11.07639	1.40667	38.75634
14	2.85500	1.66000	31.13930
15*	0.39989	1.84000	25.90888
16	0.50718	2.12667	23.73399
17	0.60940	2.04000	24.63968
18	0.61250	2.05000	24.55381
19	0.65404	2.00667	25.31651
20	0.47690	1.92000	25.32824

<표 2> $K_1=5, K_2=1, H=5$ 일 때 실행결과

n	OV(%)	Tr(분)	b(kg/s)
1	0.00280	7.69333	7.20000
2	0.02301	5.25333	10.36225
3	0.22107	4.19333	14.06052
4	0.22560	4.17333	14.15471
5	0.21613	4.20000	14.01405
6	0.13822	4.14000	13.27755
7	0.02438	5.72333	10.22584
8	0.04011	4.96667	11.88738
9	0.08357	4.32333	13.92762
10	0.14746	4.07000	14.97180
11	0.14114	4.15333	14.65505
12	0.17589	3.95667	15.47183
13	0.04554	3.58333	15.61213
14	25.80905	1.23000	52.14524
15	8.10248	1.51333	34.83707
16	0.04065	5.90333	9.34346
17	0.00042	23.49667	2.29873
18	0.08303	4.09333	14.64282
19*	0.06098	2.18667	22.33487
20	0.41097	2.11333	23.64592

<그림 4> $k_1=1$ 및 $k_2=1$ 일 때 유량차 소속 함수폭 b 와 평사함수 M 의 관계



〈그림 5〉 $k_1=5$ 및 $k_2=1$ 일 때 유량차 소속 함수폭 b 와 평가함수 M 의 관계

여기에서 수행된 실험결과는 100%로 정상출력 운전중인 경우에 대한 것이다. 출력에 따라 수위응답의 시간 지연이 다르기 때문에 출력크기에 따라 다른 튜닝의 값이 얻어져야 하며^[3] 이에 대해서는 수 개의 출력에 대한 b 의 값을 얻고 전출력 범위에 걸친 보간방법으로 해결할 수 있다.

IV. 결 론

이 논문에서는 증기발생기 수위제어기를 퍼지제어기로 구성할 경우, 안전성 및 신뢰성이 강조되는 원전운전환경에서 시운전 또는 초기운전기간을 이용한 퍼지제어기 소속함수조정에 사용목적으로 간단하고 실용적인 튜닝알고리즘이 제안되었다. 제시된 알고리즘은 평가함수로서 프로세스의 계단응답인 상승시간과 최대초과량의 합을 사용하며 임의의 초기치로 주어진 소속함수의 크기를 descent method에 의해 평가함수의 최소점에서의 계단응답이 얻어질 때까지 조정해가도록 한 것이다. 평가함수는 성능요건에 따라 가중치를 변경할 수 있도록 하였으며 매번의 계단응답 실험결과로서 얻었다.

시뮬레이션 결과 유량차 소속함수의 폭이 작은 실행횟수에서 이미 설정된 평가함수의 최소점에 튜닝되었고, 평가함수의 가중치를 변경했을 때 가중치를 크게 한 인자의 성능치가 감소한 계단응답을 보이는 지점에서 소속함수가 튜닝됨으로써 가중치의 변경으로 요구되는 성능요건을 만족시킬 수 있도록 튜닝할 수 있음을 보였다. 또한 적용면에서 간단한 구성과 예측되는 튜닝경로와 결과로 인해 증기발생기의 수위제어기에 보다 실용성이 있음을 보였다.

참 고 문 헌

1. W. C. Daugherty, B. Rathakrishnan, J. Yen, "Performance Evaluation of a Self Tuning Fuzzy Controller," IEEE International Conference on Fuzzy Systems, pp.389-397, 1992.
2. H. Noruma, et.al., "A Learning Method of Fuzzy Inference Rules by Decent Method," IEEE International Conference on Fuzzy Systems 1992, pp.203-210, 1992.
3. 나난주, 권기춘, 변증남, "저출력 및 과도상태시 원전증기발생기 수위제어에 관한 연구," 한국퍼지시스템학회 논문지, 제3권 제2호, 1993, 6.
4. H. B. Curry, "The Method of Steepest Descent for Nonlinear Minimization Problems," Quart. J. Appl. Math., 2, pp.258-261, 1944.

5. S. Terunuma, et.al., "A Simulation Study on the Application of a Fuzzy Algorithm to a Feedwater Control System in a Nuclear Power Plant," Reliability Engineering and System Safety(Britain), 28, pp. 319-335, 1990.
6. T. Iijima, Y. Nakajima, "Application of Fuzzy Logic Control System for Reactor Feed-Water Control," Fifth IFSA World Congress '93 발표자료(논문집 미수록).