

## 과도현상 데이터를 이용한 영광 3호기 증기발생기 모델 개발

이 용 관, 조 병 학, 이 명 수

전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

### 요 약

영광 3호기에서 발생한 부하탈락으로 인한 과도현상 때의 운전 데이터를 이용하여 전체의 운전 영역에서 잘 맞는 증기 발생기의 모델을 개발하였다. 모델링 기법으로는 유전자 알고리즘이 사용되었으며, 모델은 물리변수(물리적 의미를 갖는 변수)를 갖는 함수들로 구성하였다. 과도현상시의 데이터를 이용하여 증기발생기의 시변 특성을 직접 추정하기 위해 일부 물리변수를 급수온도에 대해 비선형으로 정의하였다. 잘 알려져 있는 실측 데이터를 사용하는 모델링 기법들은 선형 시불변 계에서만 적용이 가능하여 증기발생기와 같이 강한 시변 특성을 보이는 계의 모델링에 과도현상 때의 데이터를 적용할 수 없다. 물리변수를 직접 추정하면 물리적 원칙에 의해 값의 범위가 주어지며, 운전 경험 또는 개략적인 데이터의 분석에 의해 예상되는 값의 범위를 비교적 쉽게 정할 수 있으므로 유전자 알고리즘의 적용에 유리하다. 얻어진 모델은 영광 3호기 운전원 훈련용 시뮬레이터와 발전소 설계 자료에 의해 검증되었다. 이 모델은 제어 기의 설계 및 조정과 증기유량 측정 계열의 비선형 교정에도 사용될 수 있다.

### 1. 서 론

각종 물리적 보존법칙에 기초하여 개발된 모델은 다양한 조건에서 모의가 가능하나, 수치해석상의 가정, 설계 자료의 부족 또는 대상 프로세스의 경년 변화 등으로 실제의 거동과 큰 차이를 보이는 경우가 많다. 따라서, 한정된 운전 조건에서 정확한 거동이 요구되는 경우에는 주로 실측 데이터로부터 모델을 얻는다. 실측 데이터를 이용한 모델변수 추정에는 최소차승법과 Instrumental Variable 방법 등이 널리 활용되고 있으나, 이들은 시불변 계에만 적용이 가능하다. Irving[1]은 증기발생기의 용적과 수축팽창(Shrink and Swell) 시정수 등의 물리적인 특성을 고려한 간략한 증기발생기의 모델을 전체 운전 영역에 대해 5개로 나누어 제안하고 이를 적응제어기의 설계에 활용한 바 있다. 본 논문에서는 프로세스의 시변 및 비선형 특성을 효율적으로 추정하기 위한 모델링 기법으로 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)을 사용하고 있다. 이 기법은 생물체의 진화과정을 모방한 최적화 기법으로, 구하고자 하는 변수들을 스트링으로 표현하고 적합도가 우수한 스트링 간의 교배와 돌연변이로 진화를 유도하면 Global Minimum에 도달할 수 있다는 이론적 배경을 가지고 있는 기법이다[3][7]. GA는 적합도에 의해 서만 모델변수의 성능이 결정되므로 물리변수(Physical Parameters)의 시변 특성을 직접 구할 수 있는 장점을 가지고 있다. Kristinsson[5]은 시불변 모델을 ARAMAX[2]와 물리변수로 표현하

고 GA를 적용한 후, 잘 알려진 Recursive Instrumental Variable 방식과 비교하여 GA가 정밀도와 수렴 면에서 성능이 우수함을 보인 바 있다.

## 2. 유전자 알고리즘을 이용한 모델변수 추정

### 2.1 증기발생기의 모델

본 논문에서는 주어진 운전 데이터를 활용하여 간략한 모델을 얻기 위해 그림 1과 같은 증기 발생기의 모형이 제안되었다. 일반적으로 증기유량의 측정값은 오차가 큰 경향을 보이고 있으므로 측정된 증기유량으로부터 실제의 증기유량을 추정하는 보상기를 모델에 포함시켰다.

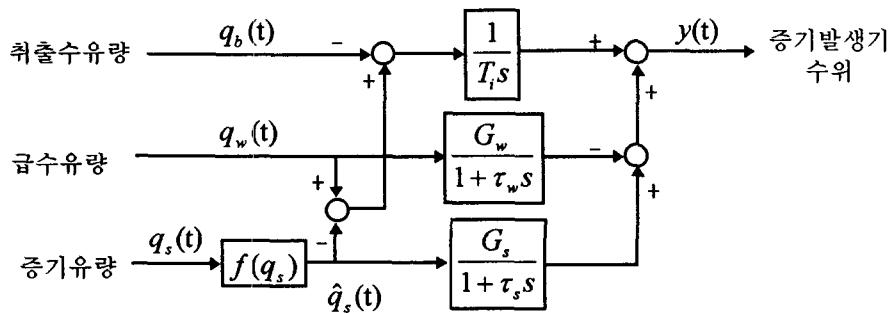


그림 1. 증기유량 보상기가 있는 증기발생기 모델.

그림 1의 함수 블록들은 각기 1)  $1/T_i s$  : 증기발생기의 용적에 의한 수위의 증감, 2)  $G_w/(1+\tau_w s)$  : 급수유량 변동에 따른 수위의 수축팽창 현상, 3)  $G_s/(1+\tau_s s)$  : 증기유량 변동에 따른 수위의 수축팽창 현상을 모의하며, 4)  $f(q_s)$ 는 증기유량을 보상한다. 증기발생기는 출력 영역에 따라 강한 시변특성을 보이는데, 일부 모델변수에 다음과 같은 비선형 특성을 부여하면 영광3호기의 증기 발생기의 전체 운전 영역에서 잘 맞음을 알 수 있었다. 1) 비선형 증기유량 교정: if  $q_s \leq b_c$  then  $\hat{q}_s = q_s - c_c \cdot (b_c - q_s)$  else  $\hat{q}_s = q_s$ , also  $\hat{q}_s = (100 - \hat{q}_s) \cdot a_c + \hat{q}_s$ . 2) 급수유량에 의한 수축팽창의 시정수:  $\tau_w = a_w \cdot e^{-b_w(T_w - c_w)} + d_w$ . 3) 급수유량에 의한 수축팽창의 이득: if  $T_w \leq b_{gw}$  then  $G_w = a_{gw}$ , else  $G_w = a_{gw} - (T_w - b_{gw}) \cdot c_{gw} / 100$ . 4) 증기유량에 의한 수축팽창의 이득: if  $T_w \leq b_{gs}$  then  $G_s = a_{gs}$ , else  $G_s = a_{gs} - (T_w - b_{gs}) \cdot c_{gs} / 100$ . 5) 이 밖의 모델변수  $T_i$ ,  $G_w$ ,  $\tau_s$ 는 전체의 운전 영역에서 일정한 값을 갖는 것으로 간주하였다. 효율적으로 유전자 알고리즘의 진화를 유도하기 위해 각 모델변수들이 갖는 값의 범위를 변수의 물리적 의미와 개략적인 데이터 분석에 의해 표 1과 같이 정하였다.

표 1. 유전자 알고리즘에서의 모델변수 추정 범위.

모델변수	최소값	최대값	모델변수	최소값	최대값
$T_i$	40	50	$\tau_s$	3	10
$c_{s_1}, c_{s_2}, c_{s_3}$	-0.1, 0, 0	0, 1; 1	$a_{gw}, b_{gw}, c_{gw}$	0.2, 10, 0	1, 90, 1
$\hat{q}_b$	0	1	$a_{gs}, b_{gs}, c_{gs}$	0.5, 40, 0	2, 90, 1
$a_w, b_w, c_w, d_w$	10, 0, 15, 1	40, 0, 1, 30, 5			

## 2.2 유전자 알고리즘

유전자 알고리즘(GA)는 1970년대 중반에 Holland에 의해 이론이 정립된 이후 최적화, Image Processing과 시스템 Identification 등의 문제에 다양하게 응용되고 있다[5][8]. GA에서는 구하고자 하는 변수값을 스트링으로 코딩한다. 스트링으로 코딩된 한 Set의 변수들을 개체(Individual)라 부르며, 이들은 집단(Population)을 이룬다.  $T_n$  세대에서 적합도가 우수한 개체는 높은 확률로 선택되어 교배와 돌연변이 연산을 거친 후  $T_{n+1}$  세대의 집단으로 재생된다 [3][7]. GA는 교배(Crossover), 돌연변이(Mutation)와 재생(Reproduction)의 대표적인 세 가지 연산자를 가지고 있는데 교배와 돌연변이는 각각  $P_c$ 와  $P_m$ 의 확률로 이루어 진다. 적합도는 GA의 기본 원칙인 적자생존의 지표가 되므로 매우 중요한 의미를 가진다. 접합도는 보통 모델링 오차의 합수이며, 실측값과 모델에서 계산된 값의 패턴을 일치시킨다는 관점에서 다음과 같은 성능지표를 최소화하도록 설정하였다.

$$s_e(k) = \text{MIN}\{e(k-1)^2, e(k)^2, e(k+1)^2\}, \quad (1)$$

여기서  $e(k)$ 는 time step  $k$ 에서의 측정값과 모델에 의해 계산된 값 사이의 오차를 나타낸다. 또한, 집단에 있는 스트링들은 랜덤 값으로 초기화되므로 진화 초기의 미소한 적합도의 차이는 별다른 의미를 갖지 못한다. 따라서, 적합도를 진화 횟수에 따라 Scheduling하면 진화 초기에 많은 개체 사이에 정보 교류가 활발하게 이루어져 효율적인 진화를 유도할 수 있다. 본 연구에서는 아래와 같은 Sigmoid 형태의 Scheduling 함수에 의해 적합도가 계산된다.

$$Fit = e^{-f_s \left\{ \sum_k s_e(k) \right\} / \sigma}, \quad f_s = 1 / (1 + e^{-\alpha(n-\beta)}), \quad (2)$$

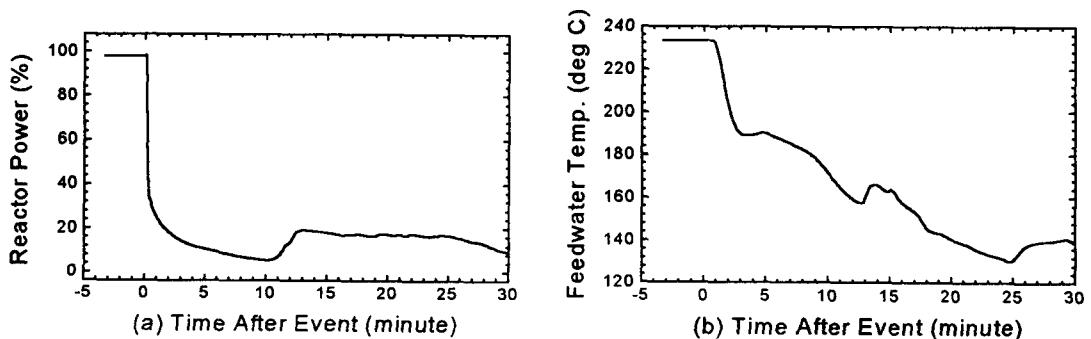
여기서  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 Sigmoid 함수의 모양에 영향을 주는 상수 값이며,  $n$ 는 GA의 진화 횟수이다.  $\sigma \gg 1$ 는 적합도가 수치적으로 안정된 값을 갖도록 임의로 주어진다.

## 2.3 증기발생기 모델변수의 추정

영광 원자력발전소 3호기의 부하탈락 과도현상 데이터는 PMS(Plant Monitoring System)에 5초 간격으로 자동 기록된 것으로 각종 유량이  $\delta P$ 로 되어 있다. PMS 데이터는 부하탈락 발생 이전 3분간의 데이터를 함께 제공하고 있고, 이때의 출력은 약 100% 정상상태에 있었으므로 이 값을 기준으로 증기유량과 급수유량을 다음과 같이 백분율 값으로 환산하였다.

$$q(t) = 100 \sqrt{\delta P(t) / \delta P_{100}} (\%) \quad (3)$$

여기서,  $\delta P_{100}$ 은 부하탈락 이전 데이터의 평균값이다. 증기발생기 모델 추정과 관련된 변수들의 부하탈락에 의한 과도현상을 그림 2에 보였다.



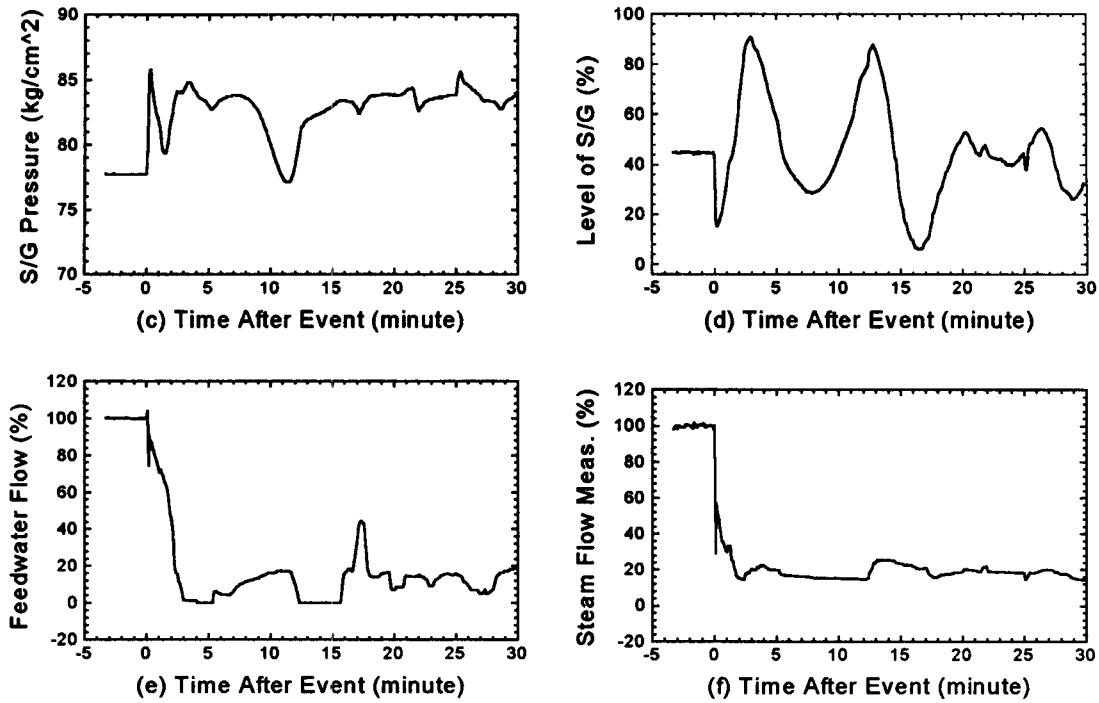


그림 2. 증기발생기 모델 추정에 사용된 영광 원자력발전소 3호기의 운전 변수.

이들 실측 데이터를 이용하여 표 1에 보인 16개의 모델변수를 추정하기 위한 GA의 변수 값을 아래의 표 2에 보였다. 유전자 집단은 250개의 개체를 갖도록 구성하였고, 각 모델변수는 24 비트의 Gray 코드로 표현하였다. 표 2에서  $n_c$ 는 한번 선택된 두 개의 스트링에 대해 교배가 이루어지는 횟수를 나타내며,  $N$ 는 GA의 총 진화 횟수를 나타낸다.

표 2. 모델변수 추정에 사용된 유전자 알고리즘의 변수 값.

$P_m$	$P_c$	$n_c$	$\alpha$	$\beta$	$\sigma$	$N$
0.00333	0.6	8	0.02	25	1.0e5	500

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 유전자 알고리즘

표 1에 보인 모델변수의 범위와 표 2에 보인 GA의 작동 변수를 사용하여 500회의 진화 과정을 통해 표 3의 증기발생기의 모델변수를 얻었다.

표 3. 유전자 알고리즘에 의해 추정된 증기 발생기의 모델변수 값.

$T_i$	$a_c$	$b_c$	$c_c$	$\hat{q}_b$	$a_w$	$b_w$	$c_w$
46.906	-0.0632	20.741	0.8013	0.9118	20.325	0.0248	26.991
$d_w$	$\tau_s$	$a_{bw}$	$b_{bw}$	$c_{bw}$	$a_{gw}$	$b_{gw}$	$c_{gw}$
4.7893	9.4503	0.4632	47.769	0.2851	1.4105	68.992	0.6302

GA는 계산량이 방대하여 적용하기가 어렵다고 일반적으로 알려져 있으나, 물리변수와 이의 추

정 범위를 적용한 결과 Pentium PC 75Mhz로도 30분 이내에 표3의 모델변수를 얻을 수 있었다. 또한, 그림3(f)에서 나타난 바와 같이 30회의 진화(계산 시간 2분)만으로도 상당히 정확한 값을 얻을 수 있어 계산 속도 면에서는 그다지 문제가 되지 않음을 볼 수 있다.

### 3.2 증기발생기 모델

그림 1에 보인 증기발생기 모델에 표 3의 모델변수를 적용하고, 부하탈락 과도현상 때의 급수 유량, 증기유량과 증기온도를 입력하여 시뮬레이션한 결과 그림 3(a)에 보인 증기발생기 수위를 얻었다. 실측된 증기발생기의 수위와 비교하여 매우 정확한 결과를 보여주고 있음을 볼 수 있다. GA에 의해 추정된 비선형 모델변수는 그림 3(b-e)에 보였다.

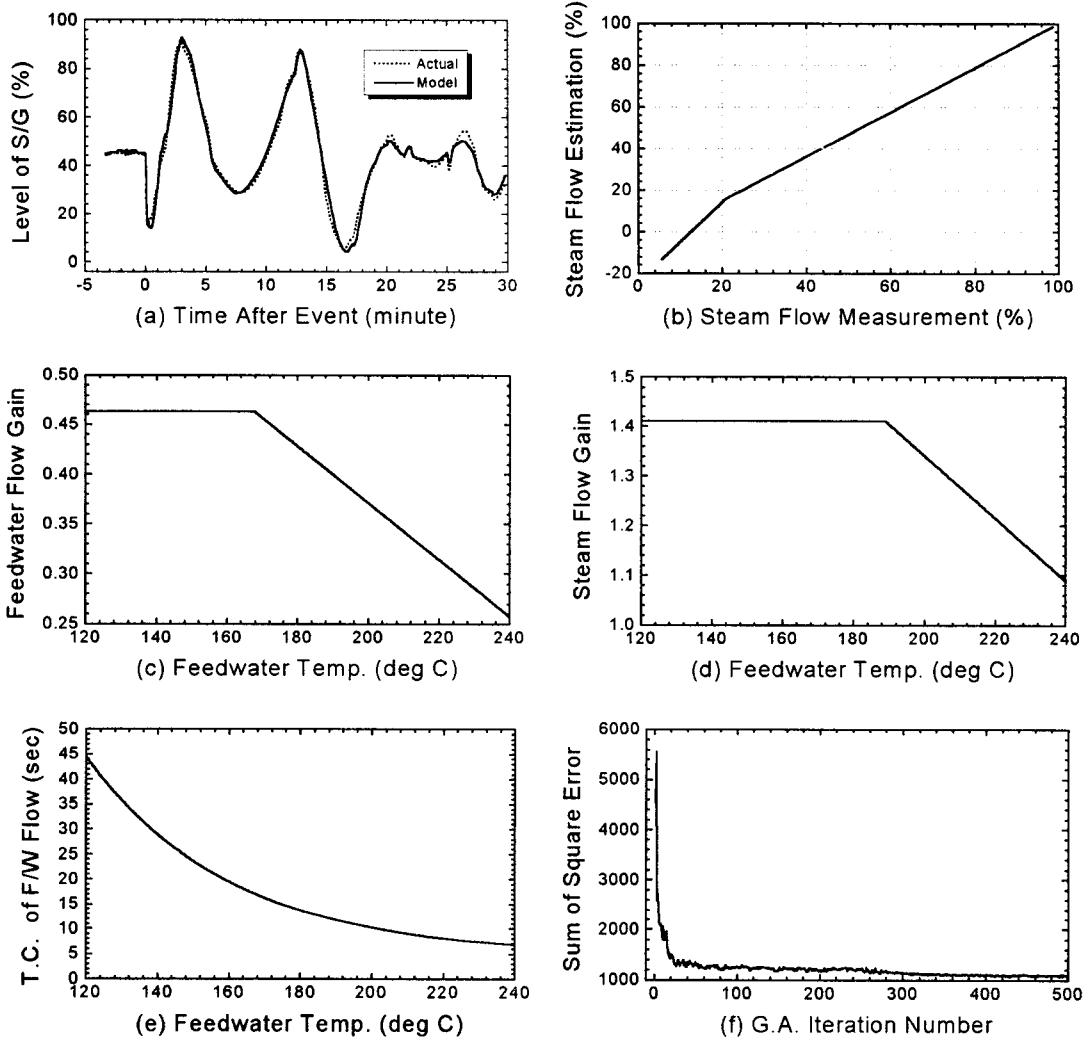


그림 3. 추정된 증기 발생기의 수위, 모델변수 및 유전자 알고리즘의 성능지표.

증기발생기의 용적과 관계가 있는 적분상수  $T_i$ 는 물리적으로 100% 출력에 해당하는 급수유량이 공급될 때 0%에 있던 수위가 100% 까지 상승하는데 걸리는 시간이다. 설계 자료[6]에 의하면 증기발생기의 내부에 순수한 물만 존재할 때는 약 104초가 걸리는 것으로 계산되지만, 실제로는

증발 및 상승부(Evaporate and Rise Section)에 존재하는 Void(정상운전시 약 44.3%)가 고려되어야 하며, 모델에 의해  $T_i$ 는 49.906초로 추정되었다. 그림 2(e,f)에 나타난 바와 같이 약 20% 이하의 운전 영역에서는 취출수유량이 있음에도 불구하고 증기유량이 급수유량보다 큰 값을 지시함을 볼 수 있다. 추정된 모델에 의하면 측정 증기유량이 20%일 때 실제 값이 15% 정도이고, 그 이하에서는 더 큰 폭의 오차가 발생하는 것으로 나타났다. 이 현상은 이때의 급수온도가 현저히 내려가고 따라서 급수의 밀도가 증가하여 측정값보다 많은 양의 급수가 유입되는 효과를 고려하더라도 계기의 교정에 문제가 있음을 보이고 있다. 취출수유량은 측정이 가능하지만 PMS에 기록이 없어 모델변수로서 이 값을 추정한 결과 100% 출력 때의 급수유량에 비해 0.9118%인 것으로 나타났다. 취출수유량은 보통 27ton/hr로 운전되고 있고 100% 출력일 때의 급수유량이 2,880ton/hr이므로 실제 값이 0.937%임을 고려할 때 비교적 정확하게 추정 되었음을 볼 수 있다. 본 연구에서 적용하는 모델은 증기압력과 온도가 증기유량에 종속되는 것으로 간주하였으므로, 증기압력과 온도가 수위에 미치는 영향은 별도로 고려하지 않았다. 수축과 팽창은 저출력에서 크게 나타나며 이것은 이 때의 급수온도가 고출력일 때에 비해 현저히 낮기 때문이다(그림 2(b) 참조). 따라서, 모델에서는 수축팽창의 시변특성을 고려함에 있어 매개변수로 원자로 출력(그림 2(a) 참조) 대신 급수온도를 택하였다. 급수온도에 따른 수축팽창의 시변특성을 고려한 급수유량과 증기유량의 수위에 대한 비선형 이득이 그림 3(c,d)에 나타나 있다. 선행 연구[4]에 따르면 이론적으로 증기유량에 의한 수위의 이득이 급수유량에 의한 것보다 약 3배 정도 큰 것으로 나타나 있고, 그림 3(c,d)에 따르면 추정된 모델도 같은 경향을 보이고 있다. 따라서, 이를 두개의 이득을 동일시한 Irving[1]의 모델은 잘못된 것임이 밝혀졌다. 증기발생기의 수위는 낮은 온도의 급수가 공급될수록 수축 현상도 커지고 지속 시간도 길어진다. 정상상태의 데이터를 사용한 Irving은 급수유량에 대한 수위의 시정수가 증기발생기 출력과 대략 지수함수의 관계를 가짐을 보였지만, 본 연구의 모델에서는 이를 급수온도에 대한 지수함수로 보아 그림 3(e)의 추정 결과를 얻었다. 전체의 운전 영역에서 증기유량이 수위에 미치는 영향의 변화(시변특성)는 급수유량이 수위에 미치는 영향의 변화에 비해 매우 작다. 이것은 앞서 언급한 바와 같이 급수유량에 의한 수축팽창에 큰 영향을 미치는 급수온도는 출력에 따라 큰 폭으로 변하지만, 증기유량에 의한 수축팽창에 영향을 주는 증기발생기 내부에 있는 물의 온도는 크게 변하지 않기 때문이다. 이와 같은 이유로 증기유량이 수위에 미치는 시정수  $\tau_s$ 는 전체의 운전 영역에서 일정한 값을 갖는 것으로 보았고, 계산 결과 9.45초로 추정되었다. 그러나 저출력일수록 증기발생기 내부에 물이 많아지고, 이로 인해 같은 증기유량으로도 수축팽창의 폭이 커지는 현상을 고려하여 이득  $G_s$ 는 급수온도에 따라 비선형 값을 갖도록 하였다. 이의 추정 결과는 그림 3(d)에 보였으며, 예상했던 대로 그림 3(c)에 보인 급수유량이 수위에 미치는 영향보다 작은 영향을 가짐을 볼 수 있다. 흥미 있는 사실은 이 모델에 의하면 100% 정상 운전 중 갑자기 급수유량과 증기유량의 공급을 차단하면 과도현상이 지난 후 수위가 약  $G_s - G_w = 1.13 - 0.275 = 0.855$ (85.5%) 정도 떨어지는 것으로 계산되었는데 이 값은 협역 수위 설정치가 44% 이므로 -41.5%에 해당한다. 이 값은 광역 수위로는 46.9%에 해당하고, 영광 3호기 훈련용 시뮬레이터에 같은 현상을 모의하여 비슷한 결과를 얻었다. 본 논문에서는 일반화될 수 있는 증기발생기의 모델을 구하는 데 목적을 두었으므로 급수유량을 Downcomer와 Economizer로 분리하여 고려하지 않았다. 이들이 수위에 미치는 영향은 서로 다를 것이므로 Downcomer 유량에 의해 주로 운전되는 저출력 영역에서는 약간

의 오차가 발생함을 볼 수 있다. 그림 3(a)에서 보는 바와 같이 부하탈락 이후 20-30분 사이에 실측값이 모델에 의해 계산된 값보다 크게 변동되는데, 이 현상은 증기발생기 수위가 Economizer 유량보다 Downcomer 유량에 의해 크게 영향을 받기 때문으로 보인다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 통상적으로 발전소에서 발생할 수 있는 과도현상 데이터를 이용하여 효율적으로 증기발생기 모델의 전체 운전 영역에서의 시변특성을 구하는 방법을 보였다. 모델은 수위의 거동을 대표적으로 표현할 수 있는 물리적 의미를 갖는 변수들로 구성하였고, 이들 모델변수의 추정에는 유전자 알고리즘이 적용되었다. 이들 변수가 갖는 값의 범위는 물리적으로 한정되므로 유전자 알고리즘은 비교적 많은 계산량을 처리함에도 불구하고 PC에서도 수분 이내에 정확한 모델을 제공함을 볼 수 있었다. 결과로 얻은 모델로부터 계산된 수위는 실측값과 비교하여 2.4178%의 표준편차를 보여 매우 정확하였다. 영광 3호기 증기유량의 측정이 부정확함이 확인되었으며 이를 정확히 교정하는 방안도 제시하였다.

#### References

- [1] E. Irving et al., "Toward efficient full automatic operation of the PWR steam generator with water level adaptive control," Proc. 2nd international conference on boiler dynamics and control in nuclear power stations 2, Bournemouth, October, 1979. Published by the British Nuclear Energy Society, London, pp. 309-329.
- [2] Graham C. Goodwin and Kwai Sang Sin, "Adaptive Filtering Prediction and Control," Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1984, pp. 262-275.
- [3] David E. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning," Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989, pp. 89-145.
- [4] Man Gyun Na and Hee Cheon No, "Design of an adaptive observer-based controller for the water level of steam generators," Nuclear Engineering and Design 135, 1992, pp. 379-394.
- [5] Kristinn Kristinsson and Guy A. Dumont, "System Identification and Control Using Genetic Algorithms," IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 22, No. 5, September/October 1992, pp. 1033-1046.
- [6] Z015-DD-301-04, "Fluid Systems Engineering Design Data for Plant Safety, Performance and Containment Analyses of Yonggwang Nuclear Power Plant Units 3 and 4," Nuclear Power Systems, Combustion Engineering, Inc., Windsor, Connecticut, 1992.
- [7] Stephanie Forrest, "Genetic algorithms: Principles of Natural Selection Applied to Computation," Science Vol. 261, No. 13, August 1993.
- [8] Byung Hak Cho and Hee Cheon No, "Design of Stability and Performance Robust Fuzzy Logic Gain Scheduler for Nuclear Steam Generators." IEEE Trans. Nuclear Science," accepted for publication.