

## Modeling and Parameter Estimation of Superheater and Desuperheater

이순영\* · 신휘범†  
(Soonyoung Lee · Hwi-Beom Shin)

**Abstract** - In this paper, the mathematical models of the superheater and the desuperheater are derived based on the fundamental laws of physics, mass and energy balance. The parameters of the models are developed for the 500[MW] thermal power plant using the actual data. The simulated model outputs are well matched with the actual ones. It is expected that the proposed models are useful for the temperature controller design of the thermal power plant.

**Key Words** : Superheater, Desuperheater, Energy balance, Modeling, Parameter identification

### 1. 서론

보일러에서 발생한 증기는 수분을 포함한 습증기이다. 이 수분을 증발시키고 나아가 온도를 더 높여 과열증기로 만드는 장치가 과열기이다. 과열 증기의 온도제어는 주증기 온도를 일정하게 유지하는 것이 목적인데, 과열기와 과열저감기에 있는 과열저감기에서 분사되는 물의 양을 조절하여 수행된다. 각 과열기의 주된 입력은 증기온도, 증기흐름, 연소열이며 출력되는 증기 온도와 증기흐름은 다음 과열기의 입력으로 작용한다[1].

과열기의 정격온도 유지는 발전소 효율과 밀접한 관계가 있는데 설계치 보다 높을 경우 효율은 증가되나 과열기, 터빈 재질의 열응력 발생으로 보일러의 수명 단축과 손상의 원인이 된다. 또한 정격 이하의 온도로 운전 할 경우 효율 감소뿐 아니라 증기의 질 저하로 인하여 터빈 회전 날개의 침식 유발 등의 문제가 발생된다.

과열기의 정확한 제어를 위해서는 과열기와 과열저감기에 대한 동특성 모델이 필요하다[2]. 그러나 이에 대한 연구는 매우 미비한 실정이며 기존의 연구들도 많은 가정 하에 수행되어 사용에 한계가 있다[3,4]. 실제로 대부분의 발전소에서는 입출력 관계만 알 수 있는 단순한 로직형태의 모델을 사용하고 있어 정확한 제어나 환경 변화에 적절히 대응하지 못하고 있다.

본 논문에서는 에너지 평형 식을 이용하여 과열기 및 과열저감기에 대해 물리적으로 의미 있는 동특성 모델을 유도하였다. 파라미터 추정 및 검증에는 Matlab System Identification Toolbox의 idnlgrey 함수와 pem 함수를 사용

하였으며, 500[MW] 발전기 운전 데이터를 이용하여 시뮬레이션 하였다.

### 2. 과열기 및 과열저감기 모델링

#### 2.1 과열기 모델링

과열기는 그림 1에서처럼 수증기가 보일러 내에 설치된 관을 통해 지나가 수증기의 온도를 증가시키는 역할을 한다. 에너지 평형은 과열기에 입력 및 출력되는 열에 의해 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{d}{dt} [\rho_s u_s V_s + m_a C_a T_a] = Q + \dot{m}_i h_i - \dot{m}_o h_o \quad (1)$$

여기서  $\rho_s$ 는 과열기 내의 수증기 밀도[kg/m<sup>3</sup>]이고,  $V_s$ 는 과열기의 부피[m<sup>3</sup>]이다. 또한  $Q$ 는 보일러로부터 받은 열 흐름[kJ/s]이고,  $m_a$ ,  $C_a$  및  $T_a$ 는 과열기 몸체의 질량, 비열 상수 및 온도를 각각 나타낸다.  $h_i$ 와  $h_o$ 는 입력 및 출력되는 수증기의 엔탈피[kJ/kg]를 각각 나타낸다.  $\dot{m}_i$ 와  $\dot{m}_o$ 는 입력 및 출력 되는 수증기 흐름[kg/s]을 나타내는데 수증기의 속도가 관의 길이에 비하여 매우 빠르므로  $\dot{m}_i = \dot{m}_o$ 라고 가정할 수 있다.  $u_s$ 는 과열기 내에 있는 수증기의 내부에너지[kJ/kg]를 나타내며, 관계식  $u_s = h_s - p/\rho_s$ 을 이용하여 위 식을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$h_s V_s \frac{d\rho_s}{dt} + \rho_s V_s \frac{dh_s}{dt} - V_s \frac{dp}{dt} + \frac{d}{dt} [m_a C_a T_a] = Q + h_i \dot{m}_i - h_o \dot{m}_i \quad (2)$$

여기서  $p$ 는 수증기 압력을 나타낸다. 보일러로부터 받은 열 흐름  $Q$ 는 보일러 연료의 열량 관계에 의해 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$Q = H \cdot \dot{m}_{fuel} \quad (3)$$

\* 정회원 : 경상대학교 전기공학과 교수, 공학연구원

† 교신저자, 정회원 : 경상대학교 전기공학과 교수, 공학연구원

E-mail : hbshin@gnu..kr

접수일자 : 2010년 8월 24일

최종완료 : 2010년 9월 27일

여기서  $\dot{m}_{fuel}$ 은 보일러에 인가되는 미분단 질량 흐름 [kg/s]이다.  $\rho_s$ 와  $p$ 의 변화율은 매우 작으므로 이들에 대한 미분값은 0으로 가정하고, 엔탈피와 비열 상수의 관계  $h = C_p T$ 를 이용하면 식 (2)는 다음과 같이 된다.

$$C_p \rho_s V_s \frac{dT_s}{dt} + \frac{d}{dt} [m_a C_a T_a] = H \dot{m}_{fuel} + C_p (T_i - T_o) \dot{m}_i \quad (4)$$

여기서  $C_p$ 는 수증기의 비열 상수[kJ/kg·K]를 나타내고,  $T_i$ 와  $T_o$ 는 입력 및 출력 수증기의 온도[°C]를 나타낸다. 과열기 몸체의 온도와 과열기 내 수증기의 온도의 비는 전부 하대에서 일정하다고 가정할 수 있으므로 ( $T_o/T_s = k_a$ ), 과열기 몸체로 전달되는 열 흐름은 다음과 같이 된다.

$$\frac{d}{dt} [m_a C_a T_a] = k_a m_a C_a \frac{dT_s}{dt} \quad (5)$$

위의 식을 이용하여 식(4)를 다시 쓰면 다음과 같이 된다.

$$(C_p \rho_s V_s + k_a m_a C_a) \frac{dT_s}{dt} = H \dot{m}_{fuel} + C_p (T_i - T_o) \dot{m}_i \quad (6)$$

위의 식은 과열기 몸체를 증기에 포함시켜 표현한 식이다. 위 식의 좌변항은 과열기의 열 흐름이므로 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$(C_p \rho_s V_s + k_a m_a C_a) \frac{dT_s}{dt} = (C_p \rho_s V_s + k_a m_a C_a) \frac{dT_o}{dt} + k_f \quad (7)$$

위의 식을 이용하여 식(5)을 다시 쓰면 다음과 같은 결과 식을 얻는다.

$$\frac{dT_o}{dt} = K_1 (K_2 \dot{m}_{fuel} + \dot{m}_i (T_i - T_o) + K_3) \quad (8)$$

여기서 각 변수들은 다음과 같다.

$$K_1 = \rho_s V_s + k_a m_a C_a / C_p, \quad K_2 = \frac{H}{C_p}, \quad K_3 = \frac{k_f}{(\rho_s V_s + k_a m_a C_a)} \quad (9)$$

과열기의 출구 온도는 입구 온도  $T_i$ 에 의해 제어된다. 측정 가능한 변수는  $T_i$ ,  $T_o$ ,  $\dot{m}_i$ ,  $\dot{m}_{fuel}$ 이며 추정해야 할 파라미터는  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ 이다.

## 2.2 과열저감기 모델링

과열저감기의 열평형 관계를 그림 2에 나타내었다. 그림 2의 질량과 에너지 평형 관계를 식으로 표현하면 다음과 같이 된다.

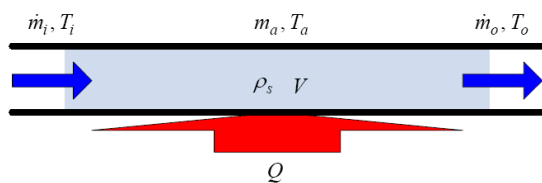


그림 1 과열기 모델  
Fig. 1 Superheater model

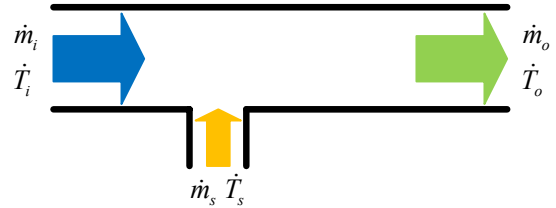


그림 2 과열저감기 모델  
Fig. 2 Desuperheater model

$$\dot{m}_i + \dot{m}_s = \dot{m}_o \quad (10)$$

$$Q_i + Q_s = Q_{out} \quad (11)$$

여기서  $\dot{m}_i$ 와  $\dot{m}_o$ 는 과열저감기의 입력 및 출력되는 수증기 흐름[kg/s]을 나타내며,  $\dot{m}_s$ 는 과열저감기에서 분사되는 물의 양[kg/s]이다. 또  $Q_i$ 와  $Q_s$ 는 입력되는 수증기에 의한 열량[kJ]과 분사되는 물에 의한 열량을 각각 나타내며  $Q_{out}$ 는 과열저감기에서 출력되는 열량으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{out} = Q_o + Q_c \quad (12)$$

여기서  $Q_o$ 는 출구 증기 열량이고  $Q_c$ 는 과열저감기에서 공기중으로 방출하는 열량을 나타낸다. 이제 식 (3.12)를 미분하면

$$\frac{dQ_i}{dt} + \frac{dQ_s}{dt} = \frac{dQ_{out}}{dt} \quad (13)$$

또는

$$h_i \dot{m}_i + m_i \frac{dh_i}{dt} + h_s \dot{m}_s + h_s \frac{dh_s}{dt} = h_o \dot{m}_o + m_o \frac{dh_o}{dt} + \frac{dQ_c}{dt} \quad (14)$$

여기서  $h_i$ 와  $h_o$ 는 입력 및 출력 수증기의 엔탈피[kJ/kg]이며  $h_s$ 는 분사되는 물의 엔탈피를 나타낸다.

공기중으로 누설되는 열량  $Q_c$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$Q_c = k_c (T - T_c) \quad (15)$$

여기서  $T_c$ 는 과열기 표면온도이고  $T$ 는 과열저감기 안의 수증기 온도를 나타내는데 과열저감기의 시정수는 매우 빠르므로  $T = T_o$ 로 가정해도 된다.

위의 식 (15)를 이용하여 식 (14)를 다시 쓰면 다음과 같이 된다.

$$C_p m_o \frac{dT_o}{dt} = C_p \dot{m}_i T_i - C_p \dot{m}_o T_o + C_s \dot{m}_s T_s - k_c (T_o - T_c) \quad (16)$$

여기서  $T_i$ 와  $T_o$ 는 입, 출력 온도이며  $T_s$ 는 분사되는 물의 온도이다. 위 식의 좌변항의 계수는 과열저감기의 내에 존재하는 수증기의 비열 질량으로 과열저감기로 나가는 입력 수증기 흐름으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$M_{eq} = m_o = k_m \dot{m}_o \quad (17)$$

질량흐름 평형 관계식 (10)과 식 (17)을 이용하여 다시 쓰면 다음과 같은 결과식을 얻는다.

$$\frac{dT_o}{dt} = \frac{1}{k_m m_o} (\dot{m}_o (T_i - T_o) - \dot{m}_s T_i + K_1 \dot{m}_s T_s - K_2 (T_o - T_c)) \quad (18)$$

여기서  $K_1 = C_s/C_p$ ,  $K_2 = k_c/C_p$ 이다.

측정 가능한 변수는  $T_i$ ,  $T_o$ ,  $T_s$ ,  $\dot{m}_i$ ,  $\dot{m}_o$ ,  $\dot{m}_s$  이고 추정해야 할 파라미터는  $k_m$ ,  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $T_c$  이다.

### 3. 과열기 및 과열저감기 파라미터 추정

#### 3.1 과열기 파라미터 추정 및 검증

과열기 온도 모델에서 추정할 변수는 식 (9)에서와 같이  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  등 3개이다. 그림 3과 같이 발전기 출력이 500 [MW]에서 270 [MW]로 감소할 때의 데이터를 과열기 온도 모델에 대한 파라미터를 추정하는데 사용하였다. Matlab System Identification Toolbox를 사용하여 과열기 파라미터 값을 추정하면  $K_1=0.00026$ ,  $K_2=252.75$ ,  $K_3=296.13$ 이 된다. 과열기 모델링에 대한 추정 파형과 시뮬레이션 파형을 그림 4에 나타내었다.

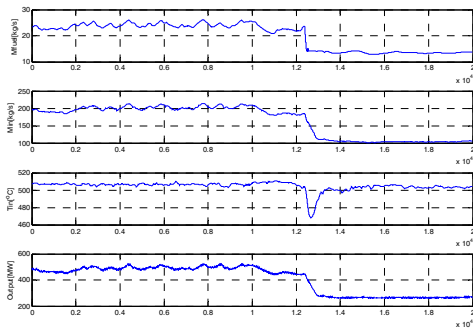


그림 3 과열기 파라미터 추정에 사용된 데이터  
Fig. 3 Data used for parameter identification of superheater

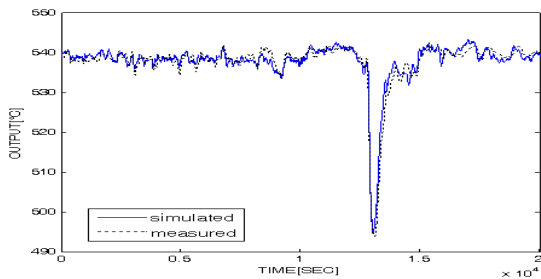


그림 4 과열기 측정 파형 및 시뮬레이션 파형  
Fig. 4 Measured and simulated waveforms of superheater

구해진 모델을 검증하기 위하여 추정된 파라미터를 사용하여 출력을 구한 후 실제 출력과 비교하였다. 이때 사용된 데이터는 발전기 출력이 270[MW]에서 500[MW]로 증가할 때의 데이터를 사용하였으며, 입출력 신호 및 과열기 출력을 그림 5와 그림 6에 나타내었다.

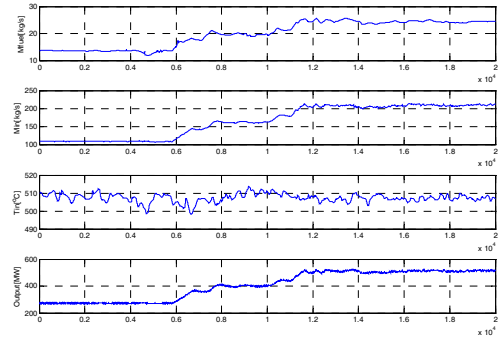


그림 5 과열기 모델 검증에 사용된 데이터  
Fig. 5 Data used for verification of superheater model

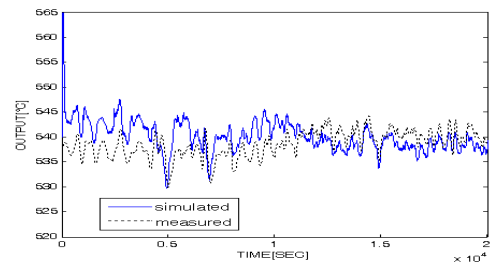


그림 6 과열기 모델 파형 및 실제 파형  
Fig. 6 Model and actual waveforms of superheater

#### 3.2 과열저감기 파라미터 추정 및 검증

과열저감기 온도 모델에서 추정할 변수는 식 (18)에서  $K_m$ ,  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $T_c$  등 4개 이다. 그림 7과 같이 발전기 출력이 500 [MW]에서 270 [MW]로 감소할 때의 데이터를 과열저감기 온도 모델에 대한 파라미터를 추정하는데 사용하였다. Matlab System Identification Toolbox를 이용하여 과열저감기의 4가지 파라미터 값을 추정하면,  $k_m=0.41$ ,  $K_1=0.63$ ,  $K_2=95.9$ ,  $T_c=489.8$ 이 된다. 과열저감기의 측정 파형과 시뮬레이션 파형을 그림 8에 나타내었다.

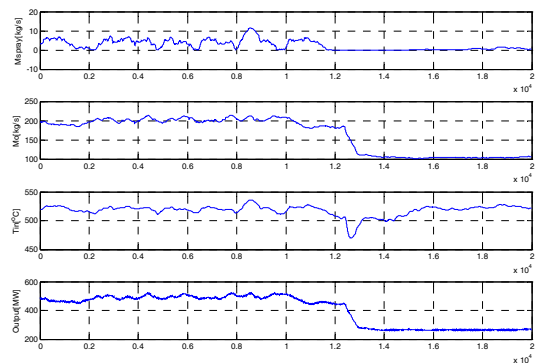


그림 7 과열저감기 파라미터 추정에 사용된 데이터  
Fig. 7 Data used for parameter identification of desuperheater

참 고 문 헌

[1] A. Ghaffari, A. Chaibakhsh, and H. Parsa, "An optimization approach based on genetic algorithm for modeling benson type boiler," Proc.of 2007 American Control Conf., vol. FrA19.4, pp. 4860-4865, July 2007.

[2] A. Chaibakhsh, A. Ghaffari, S. Ali, and A. Moosavian, "A simulated model for a once-through boiler by parameter adjustment based on genetic algorithm," Simulation Modeling Practice and Theory, vol. 15, pp. 1029-1051, Aug. 2007.

[3] H. Aling and J. Heintze, "Closed loop identification of a 600 MW Benson boiler," in Proc. 31st conf. decision control, pp. 909-914, Dec. 1992.

[4] K. Hoshmandi and M. Montazeri, "Long range predictive PID control for nonlinear boiler-turbine dynamics," IEEE Internal Conference of Industrial Technology, 2009.

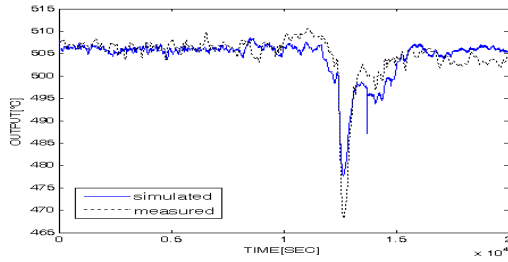


그림 8 과열저감기 측정 파형 및 시뮬레이션 파형  
 Fig. 8 Measured and simulated waveforms of desuperheater

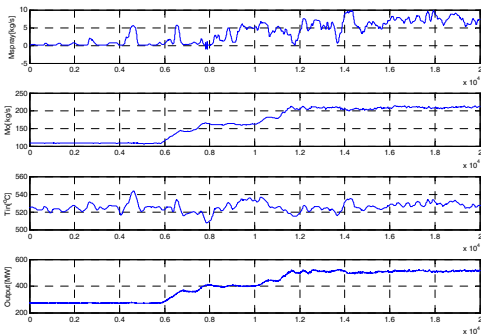


그림 9 과열저감기 모델 검증에 사용된 데이터  
 Fig. 9 Data used for verification of desuperheater model

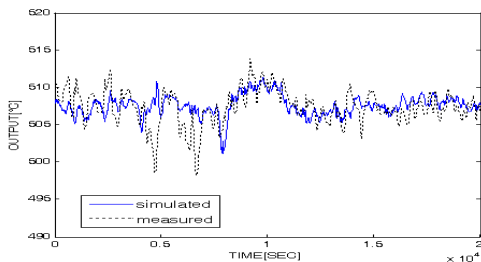


그림 10 과열저감기 모델 파형 및 실제 파형  
 Fig. 10 Model and actual waveforms of desuperheater

구해진 과열저감기 모델을 검증하기 위하여 추정된 파라미터를 사용하여 출력을 구한 후 실제 출력과 비교하였다. 이때 사용된 데이터는 발전기 출력이 270[MW]에서 500[MW]로 증가 할 때의 데이터를 사용하였으며, 입출력 신호 및 과열저감기 출력을 그림 9와 그림 10에 나타내었다.

4. 결 론

본 논문에서는 열평형 식을 이용하여 과열기 및 과열저감기에 대해 물리적으로 의미 있는 동특성 모델을 유도하였다. 또한 500[MW] 화력 발전소 운전 데이터를 이용하여 시뮬레이션 하였으며, 그 결과 시뮬레이션 파형과 실제 파형이 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었다. 제안한 모델은 과열증기의 온도 제어기 설계 및 이득 튜닝에 효과적으로 이용할 수 있을 것으로 기대된다.

저 자 소 개



이 순 영 (李 順 榮)

1980년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1982년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1985년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사), Yale 대학교, Pennsylvania 주립대학교 Calgary 대학교 방문교수, 1986년 ~ 현재 경상 대학교 전기공학과 교수 및 공학연구원 연구원



신 휘 범 (慎 輝 範)

1982년 서울대 전기공학과 졸업. 1985년 KAIST 전기및전자공학과 졸업(석사). 1992년 KAIST 전기및전자공학과 졸업(공학박사). 1990년~1993년 현대전자(주) 선임 연구원. 2000년~2002년 미국 University of Wisconsin Madison 방문교수. 1993년 ~현재 경상대학교 전기전자공학부 교수 및 공학연구원 연구원.