

보일러 드럼의 비선형 모델 개발

* 박경철 * 공재섭 * 서진현

* 서울대학교 공과대학 전기공학과

Development of Nonlinear Models for Drum boiler

* Kyoung Cheol Park * Jae Sop Cong * Jin Heon Seo

* Dept. of Electrical Eng. Seoul National University

Abstract

This paper describes nonlinear 4th order models for a natural circulation drum-boiler. The models are derived from energy balance and mass balance principles. They can be characterized by a few physical parameters that are easily obtained from construction data. The models also require steam tables for a limited operating range, which can be approximated by polynomials. The models have been validated against real plant operating data.

1. 서

발전소 보일러 제어 시스템에서 드럼수위 제어는 매우 중요한 부분을 차지한다. 만일 급수량이 많아 수위가 과도하게 높아지면 물이 열 교환기로 유입되고 반대로 급수량이 부족하면 열 교환기의 관을 과열시킬 우려가 있다. 결국, 드럼수위의 불안정은 발전소 전체 시스템을 불안정하게 하므로 안정된 제어를 위해서는 정확한 동특성 해석이 필요하다.

지금까지 발표된 보일러 드럼 모델들은 제어기 설계용 위해 단순화한 모델이거나 제한된 동작범위에서만 사용할 수 있는 모델이 대부분이었다. 따라서 넓은 동작범위에서 보일러 드럼의 과도상태를 표현하는데 어려움이 있었다.

본 논문에서는 기본적인 에너지 평형식과 질량 평형식으로부터 증발률에 관한 식을 유도하고 이 식들을 이용하여 보일러 드럼의 과도상태 해석을 위한 비선형 상태 방정식을 구했다. 또한 제시한 모델의 타당성을 보이기 위하여 시뮬레이션 결과와 실제의 발전소 운전 데이터를 비교하였다.

2. 드럼 보일러의 모델링

2.1 기본적인 평형식

보일러 드럼내에서 유체의 상태변환은 매우 빠른 열과 질량 전달 과정을 수반하기 때문에 일반적으로 열적 평형상태로 가정한다. [1.5] 따라서 보일러 드럼 전체에 대한 에너지 평형식과 질량 평형식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt} (\rho_s V_s t h_s + \rho_w V_w t h_w) = Q + q_r w f_w - q_s h_s \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} (\rho_s V_s t + \rho_w V_w t) = q_r w - q_s \quad (2)$$

여기서, ρ : 밀도 [Kg/m³] V : 부피 [m³]

h : 엔탈피 [KJ/Kg] q : 질량흐름률 [Kg/s]

Q : 유입열량 [KJ/s]

첨자 s, w, f_w 는 각각 증기, 물, 급수를 나타낸다.

드럼의 부피 V_{dr} , 드럼내의 물부피 V_w , 상승관의 부피 V_r , 하강관의 부피 V_{dc} , 그리고 상승관내의 증기부피비 a_m 을 이용하여 전체 증기부피와 물부피를 나타내면

$$V_s t = V_{dr} - V_w + a_m V_r \quad (3)$$

$$V_w t = V_w + V_{dc} + (1-a_m)V_r \quad (4)$$

이 되고, 전체의 물과 증기 그리고 상승관내의 증기에 대한 각각의 질량 평형식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} (\rho_w V_w t) = q_r w - q_w \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} (\rho_s V_s t) = q_e - q_s \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt} (\rho_s a_m V_r) = q_e - X_r q_r \quad (7)$$

여기서, q_e : 증발률 [Kg/s]

q_r : 상승관 출구의 질량 흐름률 [Kg/s]

X_r : 상승관 출구의 증기질

드럼내의 모든 부분에서 열적 평형상태를 가정하였으므로, 변수 ρ_s, ρ_w, h_s, h_w 는 드럼 압력 P에 의해 결정된다. 또한 h_{fw} 는 드럼 압력 P와 급수 온도에 의해 결정된다. 이들의 관계는 증기 상태표로부터 주어진다. [10, 11]

2.2 상태 방정식

2.1 절에서 보인 기본적인 평형식들로부터 상태 방정식을 유도하기 위해서는 증발률과 상태변수들 간의 관계식이 필요하다. 식 (1), (2), (5)로부터

$$h_c q_e = Q - (h_w - h_{fw}) q_{fw} - \rho_s V_{st} \frac{d}{dt} h_s - \rho_w V_{wt} \frac{d}{dt} h_w \quad (8)$$

를 얻는다. 이 식은 유입열량이 급수를 포화상태까지 가열하고 포화수로부터 증기를 발생시키며 나머지는 드럼내부의 에너지 상태를 변화시키는데 쓰이는 것을 나타내고 있다.

식 (5), (6)을 각각 풀어쓰면

$$\rho_w \frac{d}{dt} V_w - V_r \rho_w \frac{d}{dt} a_m = q_{fw} - q_e \quad (9)$$

$$V_{st} \frac{d\rho_s}{dP} \frac{d}{dt} P - \rho_s \frac{d}{dt} V_w + V_r \rho_s \frac{d}{dt} a_m = q_e - q_s \quad (10)$$

이 되고, 식 (8), (9), (10)을 이용하여 압력에 관한 다음의 상태 방정식을 얻는다.

$$\left(V_{wt} (\rho_w^2 - \rho_w \rho_s) \frac{dh_w}{dP} + V_{st} \left(h_c \rho_w \frac{d\rho_s}{dP} + (\rho_s \rho_w - \rho_s^2) \frac{dh_s}{dP} \right) \right) \frac{d}{dt} P = h_c \rho_s q_{fw} + (\rho_w - \rho_s) Q - (\rho_w - \rho_s) (h_w - h_{fw}) q_{fw} - h_c \rho_w q_s \quad (11)$$

상승관내의 증기부피비 a_m 은 드럼 압력 P와 증기질 X_r 의 함수로 나타내진다. [4] 따라서

$$\frac{d}{dt} a_m = \frac{\partial a_m}{\partial P} \frac{d}{dt} P + \frac{\partial a_m}{\partial X_r} \frac{d}{dt} X_r \quad (12)$$

이 되고, 식 (8), (9), (10), (12)를 다시 이용하면 압력과 드럼내의 물부피 그리고 증기질에 관한 두번째 상태 방정식을 얻는다.

$$\left(V_{st} \frac{d\rho_s}{dP} - V_r (\rho_w - \rho_s) \frac{\partial a_m}{\partial P} \right) \frac{d}{dt} P + (\rho_w - \rho_s) \frac{d}{dt} V_w - V_r (\rho_w - \rho_s) \frac{\partial a_m}{\partial X_r} \frac{d}{dt} X_r = q_{fw} - q_s \quad (13)$$

또한 식 (7)을 풀어쓰면

$$V_r a_m \frac{d\rho_s}{dP} \frac{d}{dt} P + V_r \rho_s \frac{d}{dt} a_m = q_e - X_r q_r \quad (14)$$

이 되고, 식 (8), (12), (14)를 이용하면 압력과 증기질에 관한 세번째 상태 방정식을 얻을 수 있다.

$$\left(V_r h_c \left(a_m \frac{d\rho_s}{dP} + \rho_s \frac{\partial a_m}{\partial P} \right) + V_{wt} \rho_w \frac{dh_w}{dP} + V_{st} \rho_s \frac{dh_s}{dP} \right) \frac{d}{dt} P + V_r h_c \rho_s \frac{\partial a_m}{\partial X_r} \frac{d}{dt} X_r = Q - (h_w - h_{fw}) q_{fw} - h_c X_r q_r \quad (15)$$

여기서, 하강관과 상승관에서의 운동량 보존에 대한 동특성은 무시할 수 있으므로 상승관 출구의 질량 흐름률 q_r 은 하강관의 질량 흐름률 q_{dc} 와 같다고 본다. [2] 또한 보일러 시스템 설계시의 설계 사양과 많은 실측 결과들로부터 동작 범위내에서 다음의 관계를 확인 할 수 있다. [8, 9]

$$q_r = k_1 q_e^{k_2}, \quad 0.5 < k_2 < 1 \quad (16)$$

보일러가 정상 상태에서 동작할 때 드럼을 빠져나가는 증기의 질량 흐름률 q_s 는 제어밸브의 열린 면적 A_{cv} 와 드럼 압력 P의 제곱근의 곱에 비례한다는 것이 알려져 있다. [3, 6] 그러나 드럼 출구에서 제어 밸브까지의 거리에 따른 시간 지연 때문에 보일러의 동적 상태 해석에는 이 관계를 이용할 수 없다. 따라서 이러한 시간지연 요소를 1계 미분방정식으로 근사시켜 마지막 상태 방정식을 얻었다.

$$\frac{d}{dt} q_s = \frac{1}{\tau} (k_3 A_{cv} \sqrt{P} - q_s) \quad (17)$$

위에서 얻어낸 상태 방정식 (11), (13), (15), (17)을 정리하여 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{cases}
 a_{11} \frac{dP}{dt} = hc\rho_s q_{fw} + (\rho_w - \rho_s)(Q - (h_w - h_{fw})q_{fw}) - hc\rho_w q_s \\
 a_{21} \frac{dP}{dt} + a_{22} \frac{dV_w}{dt} + a_{23} \frac{dX_r}{dt} = q_{fw} - q_s \\
 a_{31} \frac{dP}{dt} + a_{33} \frac{dX_r}{dt} = Q - (h_w - h_{fw})q_{fw} - hcX_r q_r \\
 a_{44} \frac{dq_s}{dt} = k_3 A_{cv} \sqrt{P} - q_s
 \end{cases} \quad (18)$$

여기서,

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= V_{wt}(\rho_w^2 - \rho_w \rho_s) \frac{dh_w}{dP} + V_{st}(hc\rho_w \frac{d\rho_s}{dP} + (\rho_s \rho_w - \rho_s^2) \frac{dh_s}{dP}) \\
 a_{21} &= V_{st} \frac{d\rho_s}{dP} - V_r(\rho_w - \rho_s) \frac{\partial a_m}{\partial P} \\
 a_{22} &= \rho_w - \rho_s \\
 a_{23} &= -V_r(\rho_w - \rho_s) \frac{\partial a_m}{\partial X_r} \\
 a_{31} &= V_r hc(\frac{\partial a_m}{\partial P} + \rho_s \frac{\partial a_m}{\partial P}) + V_{wt} \rho_w \frac{dh_w}{dP} + V_{st} \rho_s \frac{dh_s}{dP} \\
 a_{33} &= V_r hc \rho_s \frac{\partial a_m}{\partial X_r} \\
 a_{44} &= \tau
 \end{aligned} \quad (19)$$

3. 모델 검증 및 검토

3.1 시뮬레이션

시뮬레이션은 보령 화력 1 호기의 250MW에서 500MW에 걸친 부하추종운전 데이터를 1분 간격으로 취득하여 사용하였다. 유입열량을 제외한 모든 입력값은 실제의 데이터를 사용하였으며, 유입열량은 유입연료량을 참고하여 그림 2 에서와 같이 드럼내 물부피를 완만하게 따라가도록 정하여 사용하였다. 시뮬레이션에서 사용한 보령 화력 1 호기의 제원은 다음과 같다.

- $V_{dr} : 35.58 [m^3]$
- $V_{dc} : 45.24 [m^3]$
- $V_r : 126.2 [m^3]$

3.2 시뮬레이션 결과

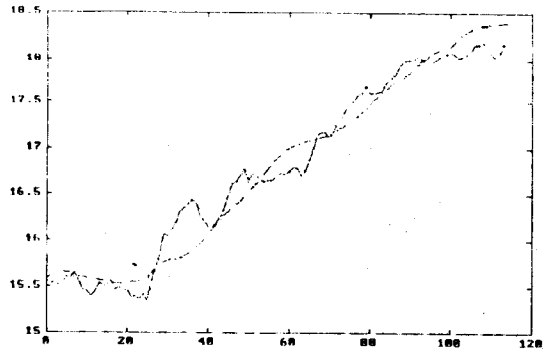


그림 1 드럼 압력

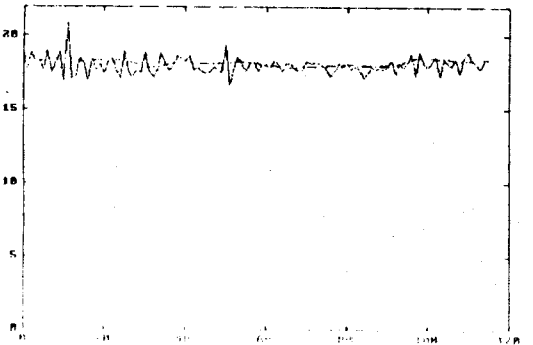


그림 2 드럼내의 물부피

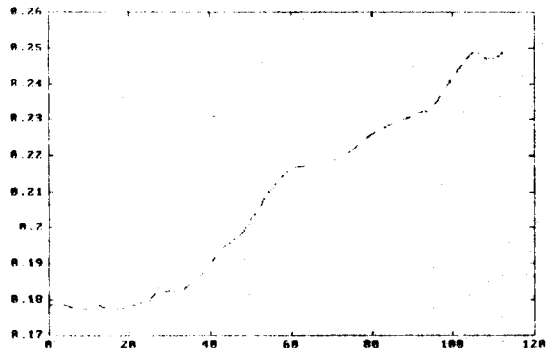


그림 3 증기질

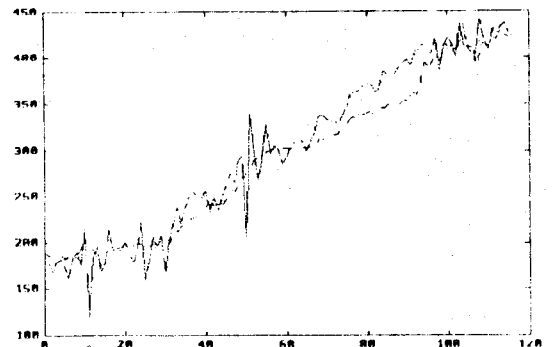


그림 4 급수와 증기의 질량 흐름률

4. 결 론

본 논문에서는 기본적인 에너지 평형식과 질량 평형식으로 부터 증발률에 관한 식을 유도하고 이 식을 이용하여 보일러 드럼의 상태 방정식을 구했다. 보일러 드럼의 빠른 동특성에 비하여 상대적으로 긴 샘플링 주기를 갖는 데이터를 사용하여 시뮬레이션하였음에도 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

참고문헌

- [1] K.L. Chien and A. Lee, "Dynamic Analysis of a Boiler," Trans. of ASME, November 1958.
- [2] K.J. Astrom and R.D. Bell, "Simple Drum Level Model," Report TFRT-7163, Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Sweden, 1979.
- [3] K.J. Astrom and K. Eklund, "A Simplified Non-Linear Model of a Drum Boiler-Turbine Unit," I.J.C., pp.145-169, 1972.
- [4] K.J. Astrom and R.D. Bell, "Simple Drum-boiler Model," IFAC Symposium Power System Modelling and Control Applications, 1988.
- [5] R. Dolezal and L. Varcop, Process Dynamics, Elsevier Publishing Co.Ltd., 1970.
- [6] R.L. Daugherty and J.B.Franzini, Fluid Mechanics with Engineering Applications, McGraw-Hill, 1985.
- [7] J.R. Welty and R.E. Wilson, Fundamentals of Momentum Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons, 1984.
- [8] J.G. Collier, Convective Boiling and Condensation, McGraw-Hill, 1981.
- [9] "Steam / its generation and use," Babcock & Wilcox Co., 1975.
- [10] S.L. Rivkin, Thermodynamic Derivatives for Water and Steam, V.H.Winston & Sons Inc., 1978.
- [11] C.A. Meyer et al., ASME STEAM TABLES, ASME, 1983.
- [12] 김 동 환, 증기 보일러 및 원동기, 동명사, 1988.
- [13] 보령 화력발전소 운전조작 설명서.
- [14] 보령 화력발전소 운전조작 설명서 부도.
- [15] 보령 화력발전소 사양.