

초임계압 관류형 보일러의 비선형모델에 관한 연구

윤석환, 이승철
중앙대학교 전기공학과

A Nonlinear Dynamic Model of a Once-Through Supercritical Boiler

S. H. Yoon and S. C. Lee
Dept. of Electrical Engineering, Chung-Ang University

Abstract- The recent trend toward increased use of the once-through supercritical boiler worldwide is mainly due to its rapid response. The transient behavior of the steam generator are essential in the study of the system performance of power plants as well as for the design of their appropriate control systems. In this paper, a mathematical model of the once-through supercritical pressure boiler is obtained by simulating a set of nonlinear differential and algebraic equations.

1. 서론

산업 및 국민경제의 발전과 함께 전력사용이 꾸준히 늘어나고 있으며 발전용량의 한계에 따른 효율적인 전력 생산 및 변환이 중요시 되고 있다. 국내에서는 각종 발전설비의 확충 및 국내 기술확보에 총력을 기울이고 있으나 아직 많은 발전설비 관련기술들을 외국에 의존하고 있어 국내기술자립이 시급한 실정이다. 또한 계통의 주파수 및 정격전압을 유지시킬수 있도록 신뢰도 및 안정도 향상을 위해 계통의 효율적인 제어가 선행되어야 한다. 복잡한 대규모의 발전설비를 분석하고 그에 필요한 제어기설계 및 해석을 위해서는 발전설비의 운전데이터가 절대적으로 필요하다. 하지만 실제 대규모의 발전설비를 설계목적으로 실험을 하는 것은 현실적으로 어려우므로 통상 컴퓨터에 의한 시뮬레이션을 통하여 필요한 운전데이터를 얻고 있다. 따라서 이를 위하여 시스템의 동특성을 잘 묘사해주는 모델링 작업이 필요하다. 규모가 크고 복잡한 시스템의 모델링은 물리적 대수방정식 및 미분방정식을 이용한 이론적 접근방식과 입출력관계로부터 상태변수 및 계수들을 추정하는 실험적 접근방식으로 나뉘어 진다. 일반적으로 제어기 설계를 위한 모델링작업은 이들 두방법을 모두 사용한다.

보일러, 즉 증기발전기의 동특성은 전체 화력발전소의 동특성에 커다란 영향을 미치게 된다. 증기발전기는 응축된 물로부터 연소가스에 의한 열입력을 받아 과열증기를 발생시키는 장치로서 드럼의 유무에 따라 드럼형보일러(drum-type boiler)와 관류형보일러(once-through boiler) 두가지로 분류된다. 관류형보일러는 드럼이 없으므로 드럼보일러에 비해 전체 열교환기의 관(metal tube)의 무게가 적고 냉각수의 수용용량이 작아 빠른속도의 출력응답을 보인다.[1] 하지만 관류형보일러는 급수제어, 출력제어, 온도

제어 등 모두 밀접한 상관관계를 갖고 있으므로 제어계통이 드럼형에 비해 훨씬 복잡하다.[4]

아임계압(subcritical pressure) 관류형 보일러는 Adams[1]에 의해 시변 상 경계(time-varying phase boundaries)를 상태변수로 갖는 모델이 최초로 소개되었으며 Shang[2]은 초임계압(supercritical pressure) 관류형 보일러를 상태공간(state-space)을 이용하여 모델링하였다. Ray[3]는 이들을 이용하여 원자력 발전에서의 아임계압 관류형보일러의 비선형모델을 구하였다.

본 연구에서는 보령화력 3, 4호기의 실제 보일러를 대상으로 수학적 모델에 기초한 초임계압 관류형 보일러 모델을 구하였으며 모델링에 필요한 계수들은 보일러의 제작 데이터 및 각 변수들의 동작점 값으로부터 구하였다. 3절에서는 비선형 미분방정식 및 대수방정식에 의한 관류형 보일러의 개루프응답특성을 비선형 시뮬레이션을 이용하여 나타내었다.

2. 초임계압 관류형 보일러의 수학적 모델링

초임계압 관류형 보일러라함은 그림 1에서와 같이 임계압력 22.09 [MPa] 이상에서 동작하는 보일러를 일컫는다. 본 연구에서 대상으로 한 보령화력 3, 4호기의 경우 75%이상의 부하에서는 초임계압상태에서 동작하고 75%이하에서는 아임계압 상태에서 동작하도록 설계되어 있다.

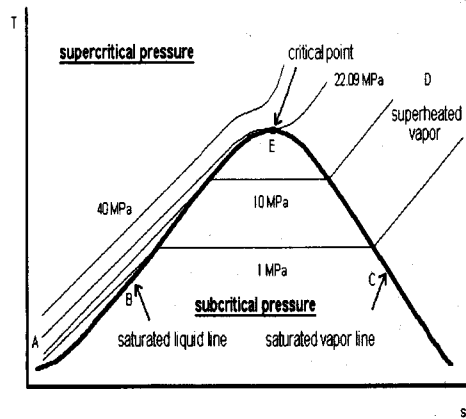


그림 1 물에 대한 온도와 엔트로피산도

초임계압 상태에서는 아임계압 상태에서의 이상류(two-phase flow : saturated water and steam)가 존재하지 않고 응축된 유체로부터 과열증기로의 연속적인 유체상태의 변화가 나타난다. 이러한 초임계압 보일러는 전체시스템의 크기를 줄일 수 있고 높은 효율을 낼 수 있는 장점을 가지고 있다[4]. 최근들어 초임계압상태에서의 보일러 설계가 주류를 이루고 있다.

2.1 시스템 모델의 가정

본 연구에서 보일러 모델개발의 주요목적중의 하나는 관류형보일러의 전체시스템의 성능평가 및 부분별 제어기 설계를 위한 동적모델을 얻는데 있다. 따라서 보일러 모델은 controllability에 기여하는 모든 계통의 물리적인 상관관계를 잘 묘사해야만 한다. 그러나 발전소 보일러와 같은 대규모의 복잡한 시스템을 모두 구현하는 것은 현실적으로 매우 어려우며 특히 제어기 설계의 연구목적으로는 간략화되고 lumped된 모델이 적합하므로 모델링을 위한 몇가지 가정이 필요하다. 가정에는 시스템 모델의 개념적 간략화를 위한 가정과 수식전개상의 lumped 모델을 사용하기 위한 가정이 있다. 시스템 모델의 개념적 간략화에 따른 가정은 다음과 같다.

1. 시스템의 동특성은 각 동작점으로부터 작은 변화(perturbation)에 의해 나타내진다.
2. 급수계통 즉, 급수가열기들은 급수온도변화등에 영향이 아주 느리게 작용하므로 급수의 엔탈피는 일정하다.
3. 파이프공기량 및 연소가스의 온도는 일정하고 열입력은 연료량에만 영향을 받는다.

다음은 초임계압 또는 아임계압 보일러를 대상으로 일반적인 열교환에 대한 lumped 모델표현을 위한 수식전개상의 가정을 나타내었다.

1. 유체의 물리적특성은 모든 직교면에 대해서 균일하다.
2. 열교환기내의 연소가스, 관, 냉각수의 축방향 열전달은 무시한다.
3. 노내 압력변화에 의한 동특성은 무시한다.
4. 열교환기의 multi-tube에서 열량흐름을 및 유체흐름은 모든 직교면에 대해 균일한 값을 갖는다.

2.2 수학적 모델링

초임계압 관류형 보일러에서는 냉각수의 상태가 아임계압과는 달리 단상류(one phase flow)의 특성을 갖는다. 즉, 물과 증기의 구분이 없이 하나의 유체가 연속적인 물리적인 특성을 갖으면서 과열증기로 변화한다. 반면에 아임계압 상태에서는 이상류구간을 거쳐 과열증기로 변화한다. 보일러력 3, 4호기의 보일러는 부하 75% 이상에서는 초임계압을 유지하므로 본 연구에서는 초임계압 영역에 대한 모델링만을 수행하였다.

보일러의 수학적 모델링을 위한 열교환기의 기본적인 모델을 그림 2에 나타내었다. 열교환기의 모델링에 관한 식은 질량평형식, 에너지평형식, 운동량평형식으로 나타낼 수 있다.

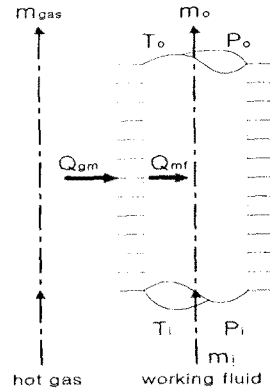


그림 2 기본적인 열교환기 모델

기호	의미	단위
m	질량흐름율	[kg/sec]
h	엔탈피	[kJ/kg]
Q	열량흐름율	[kJ/sec]
ρ	밀도	[kg/m ³]
V	부피	[m ³]
M	질량	[kg]
C	비열	[kJ/kg °C]
T	온도	[°C]
P	압력	[MPa]
L	관길이	[m]
A	관의단면적	[m ²]
D	관의직경	[m]
f	마찰저항계수	

첨자	의미	단위
i	입구	(inlet)
o	출구	(outlet)
m	관	(metal)
f	유체	(fluid)
g	가스	(gas)
c	대류	(convection)
r	복사	(radiation)

유체의 질량평형식은 질량보존의 법칙으로부터

$$m_i - m_o = V \frac{d\rho_o}{dt} \quad (1)$$

과 같이 나타낸다. 즉, 검사체적(control volume)내로 들어오는 유체의 질량흐름율과 나가는 질량흐름율의 차는 검사체적내부의 질량 축적률과 같다.

유체 및 관에서의 에너지 평형식은

$$m_i h_i + Q_{mf} - m_o h_o = V \frac{d(\rho_o h_o)}{dt} \quad (2)$$

$$Q_{gm} - Q_{mf} = M_m C_m \frac{dT_m}{dt} \quad (3)$$

로 나타낸다. 즉, "검사체적내로 유입되는 에너지 흐름율과 나가는 에너지흐름율의 차는 검사체적내부의 에너지 축적률과 같다"라는 열역학 제1법칙을 나타낸다.

운동량 평형은 유체의 흐름이 교류(turbulent flow : 攪流)이기 때문에 이론적인 식으로는 풀기가 어렵다. 따라서 운동량 평형식은

$$P_i - P_o = f_{ss} \frac{L}{2DA^2} \frac{m_i^2}{\rho_i} + \frac{L}{A} \frac{dm_i}{dt} \quad (4-1)$$

또는

$$P_i - P_o = k_1 \frac{m_i^2}{\rho_i} + k_2 \frac{dm_i}{dt} \quad (4-2)$$

과 같이 실험식을 이용할 수 있다[2]. 즉, 압력차는 마찰저항부분과 가속부분으로 나타난다.

연소가스로부터 관로의 열전달은 대류 및 복사에 의해 나타나며 실험식은

$$Q_{gm} = k_{gmc} m_g^{0.6} (T_g - T_m) \quad (5)$$

$$Q_{gm} = k_{gmr} (T_g^4 - T_m^4) \quad (6)$$

과 같다[1, 6].

관에서 유체의 열전달은 다음 (7)식과 같다.

$$Q_{mi} = k_{mi} m^{0.8} (T_m - T) \quad (7)$$

유체의 밀도와 엔탈피 등은 Steam Table로부터 보간(two dimensional interpolation)을 이용하여 각각 온도와 압력에 대한 간단한 다항식으로 나타내었다. 즉, 유체의 물성치 x 는 식 (8)과 같이 표현된다.

$$x = a_1 + a_2 * P + a_3 * T + a_4 * P * T \quad (8)$$

또한 상태변수를 온도와 압력으로 하기 위해 식(1)과 (2)식에서 밀도 및 엔탈피에 대한 미분항을 각각 온도와 압력에 대한 편미분방정식으로 나타내었다.

$$\begin{aligned} d\rho &= \left(\frac{\partial \rho}{\partial P}\right)dP + \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)dT \\ dh &= \left(\frac{\partial h}{\partial P}\right)dP + \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)dT \end{aligned} \quad (9)$$

3. 시뮬레이션 및 결과

2절에서 구한 모델을 Sulzer형 초임계압 관류형 보일러인 보령화력 3, 4호기 보일러에 적용하여 시뮬레이션 하였다. 정격부하시 보일러의 사양을 표 1에 나타내었다.

전기적 출력	500	[MW]
과열기 출력측 증기압력	24.32	[MPa]
과열기 출력측 증기온도	541	[°C]
증기흐름량	426.39	[kg/s]
연료	석탄, 병커C油	

표 1 보령화력 보일러 사양 (정격부하)

연료는 병커C油 및 석탄을 선택할 수 있도록 되어있으며 구성을 살펴보면 절탄기(Economizer), 증발기(Evaporator), 세 개의 과열기(Superheater), 두 개의 재열기(Reheater), 3개의 attemporator 가 있다. 그림 3은 보일러 내의 연소가스 및 냉각수의 흐름도를 나타내었다. 비선형 동적모델링은 정격부하에서 수행하였으며 모델의 간략화를 위해 재열기부분은 포함시키지 않았다. 모델의 차수는 각 열교환기의 출구온도, 출구압력, 그리고 입구유체흐름율을 포함한 20차 비선형 모델이다.

보일러 시뮬레이션 결과는 다음과 같이 정상상태에서 각각 어느 하나의 입력만을 동작점으로부터 5% 증가된

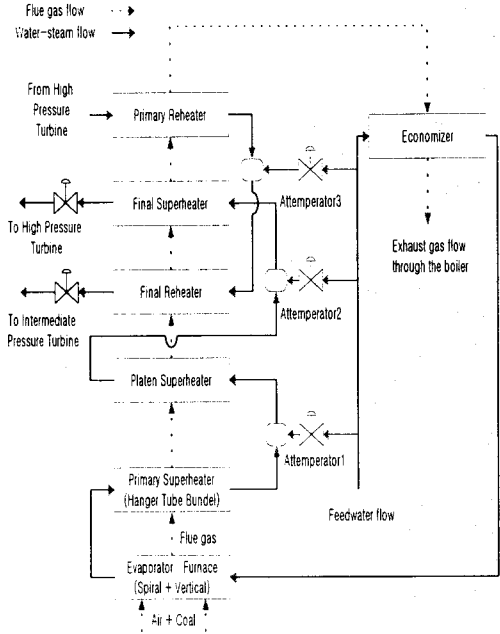


그림 3 보일러내의 연소가스 및 냉각수의 흐름도

계단입력의 값으로 변화시켜 시뮬레이션함으로써 상태변수들의 과도응답을 보였다.

CASE I 급수흐름율(feedwater flow rate)

426.39 -> 447.7095 [kg/sec]

CASE II. 연료흐름율(fuel flow)

42 -> 45 [kg/sec]

CASE III. 제어밸브 위치(control valve position)

75 -> 78.75 [%]

CASE IV. Spray water flow rate

10.84 -> 11.382 [kg/sec]

그림 4, 5, 6은 각각 CASE에 대한 과열기 출력측 증기흐름율, 온도 및 압력의 응답특성곡선을 나타낸 것이다. CASE I은 모든입력을 정격으로 유지하고 급수량만을 5% 증가했을 때의 상태변수들의 응답들이다. 증기량은 급수량과 같아지고 온도는 감소하는 반면에 압력은 입력증가만큼 증가가 나타난다. CASE II는 급수량이 일정하므로 연료의 증가가 온도의 증가로 나타남을 보여준다. CASE III는 고압터빈(high pressure turbine)으로 흘러가는 증기량을 조절하는 제어밸브의 위치를 5% 계단입력을 주었을 때 변수들의 과도응답으로서 급수량이 일정하므로 증기량은 변화시키기 전의 값으로 되돌아간다. 반면에 온도 및 압력은 감소하게 된다. CASE IV는 spray water를 증가시켰을때의 응답으로서 급수량이 일정하므로 증기량도 변화시키기 전의 값으로 되돌아 가고 온도 또한 일시적인 감소현상만 나타날 뿐이다.

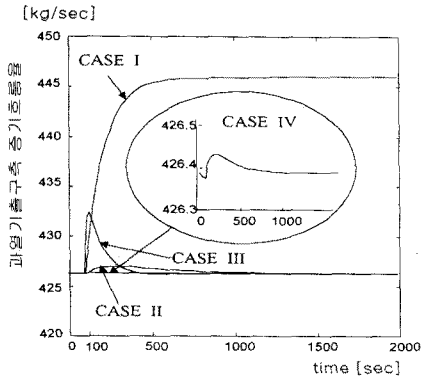


그림 4 각각 4개의 독립적인 변수들의 계단입력에 대한 과열기 출구측 증기흐름율의 과도응답 특성곡선

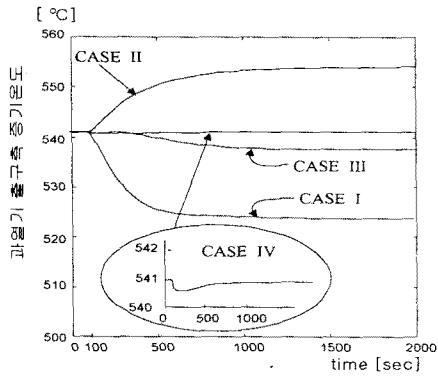


그림 5 각각 4개의 독립적인 변수들의 계단입력에 대한 과열기 출구측 증기온도의 과도응답 특성곡선

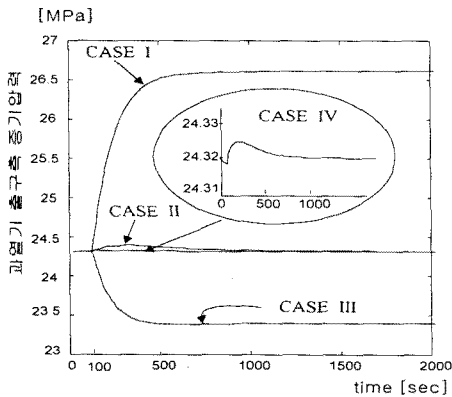


그림 6 각각 4개의 독립적인 변수들의 계단입력에 대한 과열기 출구측 증기압력의 과도응답 특성곡선

4. 결론

본 연구에서는 초임계압 관류형 보일러의 동특성을 알아보기 위한 모델을 구하고 독립적인 계단입력에 대한 시스템의 과도응답특성을 보였다. 여기서 구한 모델은 보일러의 시스템제어기설계 뿐만아니라 보일러계통의 성능평가를 위한 모델로서 사용될 수 있다. 향후 본 논문에서 구한 모델을 바탕으로 아임계압에서의 이상류를 고려한 전부하에 걸친 관류형 보일러 모델을 구하고 이를 이용한 시뮬레이션 결과와 실제 운전데이터를 비교하여 비선형 동적모델에 대한 보다 정확한 검증할 예정이다.

참고문헌

- [1] J. Adams, D. R. Clark, J. P. Spanbauer, "Mathematical Modeling of Once-Through Boiler Dynamics," *IEEE Trans.*, PAS-84, Feb. 1965, pp.146-156.
- [2] Shang, T. L., "A Dynamic Model for a Once-Through Supercritical Pressure Boiler," PhD thesis, 1971, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich.
- [3] Ray, A., and Bowman, H.F., "A Nonlinear Dynamic Model of a Once-Through Subcritical Steam Generator," *Journal of Dynamic Systems, Measurements, and Control*, TRANS. ASME, Ser. G, Vol. 98, No. 3, Sept. 1976, pp332-339.
- [4] Rohit Damodar Paranjape, "Modeling and Control of a Supercritical Coal Fired Boiler," PhD thesis, 1996, Texas Tech University
- [5] 한국전력공사 기술연구원, "보일러 계수 추정에 의한 최적 보일러 제어기 개발(I)," 1993
- [6] A. W. Ordys, et. al., "Modeling and Simulation of Power Generation Plants," Springer-Verlag, 1994, pp. 121-143.
- [7] 보령화력발전소 3, 4호기 운전조작 설명서
- [8] 보령화력발전소 3, 4호기 운전조작 설명서 부도