

보일러 시스템의 유체 순환부 동적 모사

한승엽, 이대용
한국과학기술원 화학공학과

Dynamic Simulation of a Water Circulation Unit in a Boiler System

Seung-young Han, Tai-young Lee
Dept. of Chem. Eng., KAIST, Taejeon, Korea

서론

최근 들어 화력발전을 부하 조절에 이용하는 경향이 증가하면서, 부하 변동에 따라 보일러 시스템의 부분 부하 운전 또는 시동 및 정지 등의 조작 회수가 늘고 있으며 발전 시스템은 점점 대형화 되어 가고 운전 조건도 다양해져가고 있다. 이처럼 비정상 상태의 조업이 늘어감에 따라 안전하고 효율적인 제어 시스템이 요구되었고 이를 위해서는 보일러 시스템의 열수력학적 동특성 파악이 선행되어야 한다.

보일러 시스템은 그림 1에서 처럼 드럼과 riser 및 downcomer로 구성된 유체순환부와 economizer, superheater와 같은 열교환기부 그리고 compressor, 펌프, 터빈, 밸브 등의 나머지 부분들로 이루어져 있으며, 각 부분은 모듈화시켜서 따로 해석한 후에 전체적으로 통합하는 것이 용이하다. 이 중에서 가장 해석이 어려운 부분이 유체순환부이다. 지금까지 발표된 대부분의 논문에서 제시한 모델은 물질수지식과 에너지 수지식을 기반으로 한 선형 또는 비선형 미분 방정식으로 유체 흐름에 대한 자세한 기술은 고려되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 riser와 downcomer에 대한 운동량 수지식을 첨가하여 유체 흐름이 보일러 시스템의 다른 상태 함수에 미치는 영향을 고려하였다. 또한 현장에서 조업에 도움을 줄 수 있는 실시간대 공정모사기로서의 역할을 하기 위해서는 빠른 계산 속도를 필요로 하므로, 모델식의 차원 해석을 이용하여 계산 시간을 단축하였고 급격한 변화율의 갖는 미분방정식의 경우에 발생할 수 있는 수치 해석상의 오차가 발생할 가능성을 배제하였다.

보일러 시스템 모델

가정에 의해 downcomer로 빠져나가는 유속과 riser로부터 유입되는 유속이 동일하므로 드럼 내의 물질수지식은 입구와 출구의 유속에 의해 결정된다.

$$V_{dr} \frac{d\rho_{dr}}{dt} = \dot{m}_F - \dot{m}_S \quad (1)$$

드럼과 riser에서의 밀도는 수증기 질량분율에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{1}{\rho_{dr}} = \frac{1-\alpha_1}{\rho_f} + \frac{\alpha_1}{\rho_g} \quad (2)$$

$$\alpha_1 = \frac{\text{드럼내 수증기의 질량}}{\text{드럼내 물과 수증기의 질량}}$$

드럼의 에너지 수지식은

$$V_{dr} \frac{d(\rho_{dr} h_{dr} - P_{dr})}{dt} = \dot{m}_F h_F + \dot{m}_U h_U - \dot{m}_S h_S + \dot{m}_D h_D \quad (3)$$

$$h_{dr} = (1 - \alpha_1)h_f + \alpha_1 h_g \quad (4)$$

$$h_{Li} = (1 - \alpha_{2L})h_f + \alpha_{2L} h_g \quad (5)$$

α_{2L} = riser 출구의 수증기의 질량분율

이고, riser의 운동량 수지식은

$$L \frac{\partial G}{\partial t} = P_{in} - P_{out} - G^2 \int_0^L \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\rho} \right) dx - \int_0^L \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{loss} dx - \int_0^L \rho g \sin \theta dx \quad (6)$$

$$G = \rho \omega \quad (\text{질량선속})$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{loss} = \frac{f}{D} \frac{1}{2} \rho \omega^2$$

$$\text{where } f = f(\text{Re}) = \begin{cases} 64/\text{Re} & \text{for laminar} \\ 0.316 \text{Re}^{-0.25} & \text{for } \text{Re} \leq 20000 \\ 0.184 \text{Re}^{-0.2} & \text{for } \text{Re} \geq 20000 \end{cases}$$

으로 표현된다. Riser의 에너지 수지식은

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = - \frac{\partial(Gh)}{\partial x} + \frac{4}{D} q \quad (7)$$

이고, Downcomer의 운동량 수지식

$$P_o = P_i + \rho_f g L - \frac{f G^2 L}{2D\rho_f} - \frac{G^2}{2\rho_f} \quad (8)$$

이다. 드럼의 수위는 다음과 같이 계산할수 있다.

$$V_f = V_{dr} - \frac{D_i^2 L}{8} (\pi - 2 \sin^{-1}(\frac{2H}{D_i})) + \frac{D_i}{2} HL \sqrt{1 - \frac{4H^2}{D_i^2}} \quad (9)$$

위의 모델식을 풀기 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

- 드럼 내부를 포함하여 riser와 downcomer에서는 포화상태로 조업된다[1]. 따라서 전 영역의 온도는 동일하며 외부로부터의 열은 모두 잠열로 소모된다.
- riser와 downcomer에서는 질량보존식이 항상 성립된다고 본다. 즉 관의 위치에 따른 질량 유속이 항상 일정하다.
- 드럼과 riser의 밀도, 점도 및 엔탈피는 증기의 질량분율에 대한 선형함수로 나타난다[2].
- riser의 증기질량분은 riser하단에서부터 드럼내의 출구까지 선형적으로 변하는 값을 갖는다.
- downcomer에서는 액상의 유동만이 존재하므로 누적을 무시한 정상상태의 식을 사용한다.

모델식의 order analysis

제시한 모델식은 크게 네 개의 미분방정식으로 정리될 수 있다. 물리적으로 큰 값의 차이를 보이는 수증기의 밀도와 물의 밀도의 비를 ϵ 으로 정의하면 ϵ 은 10^{-2} 정도의 크기를 갖는다. 시스템의 특성상 드럼과 riser의 수증기 질량분율도 거의 비슷한 크기를 갖는다. 즉 $O(\epsilon) \approx O(\alpha_1) \approx O(\alpha_{2L})$ 이 성립함을 의미하며, 대상으로 하는 시스템에서 주어진 사양과 예상되는 조업 조건을 이용하여 식들의 각 항의 크기를 예측할 수 있다. 드럼의 물질수지식을 $O(1)$ 으로 볼 때 riser의 운동

량 수치식인 식(6)의 좌변이 $O(\epsilon)$ 이 됨을 알 수 있고, 이는 열적 평형에 비해 운동량의 평형이 빨리 일어나는 물리적인 현상과도 일치되는 결과임을 확인할 수 있다. 따라서 G 의 변화는 다른 변수의 변화에 비해 급격한 거동을 보이므로 수치적인 오차를 발생시킬 가능성을 내포하고 있으며, Initial Value Problem의 step size를 감소시키는 결과를 초래한다. 모사의 목적이 load의 변화에 따른 순간적인 거동을 보고자 함이 아니므로 이 항은 준 정상 상태 가정을 이용하여 무시한다. 따라서 주어진 모델식은 세 개의 미분 방정식과 네 개의 비선형 방정식을 푸는 문제로 고려할 수 있다. 운동량 수치식이 첨가된 영향은 계산된 G 값의 변화가 나머지 식인 물질 및 에너지 수치식에 어느 정도 영향을 미치는가로 추측할 수 있다. 식(2)에서 riser로부터 올라오는 물과 수증기의 양은 질량선속인 G 로 표시가 가능하고 식(2)의 우변 두 항의 order가 유사하므로 step change에 의한 G 의 변화 정도만큼 모델링에 의한 오차를 줄여줄 수 있다고 여겨진다.

모사 결과 및 결론

모델로 사용한 시스템의 사양 및 조업 조건은 표 1과 같다. 100초에서 증기사용량 10% 감소시킨 경우에 대해, 다음의 세 가지 방법으로 수치모사 하였다.

- 1) 준 정상상태 가정을 하지 않은 식에 대하여 엄격한 허용오차를 만족시키는 정확한 해를 계산
 - 2) 허용 가능한 오차 범위내에서 step size를 충분히 크게 한 상태로 준정상상태를 가정한 식을 계산
 - 3) 2)와 동일한 조건에 대해서 준 정상상태를 가정하지 않은 식을 계산
- 그림 2의 (a)에 보이는 바와 같이, 온도는 세가지 경우에 대해 거의 일치한다. 그러나, 질량선속 G 에 대해서는 3)의 경우 급격한 진동을 보이는데, 이는 G 의 미분항이 급격한 변화를 갖기 때문이다. 그림 3에서는 100초에서 열입력량을 10% 감소시킨 경우에 대한 결과인데, 그림 2와 유사한 경향을 보인다.

주어진 오차 범위내에서 최적의 step size를 계산하는 IMSL subroutine을 이용한 결과, 계산 시간에 있어서도 차이를 보임을 알 수 있었다. SUN 기종의 워크스테이션을 이용한 경우, 두 번째 모사시에는 cpu time이 8초 정도 소요되었고 세번째 모사에서는 15초 정도가 소요되었다. 따라서 계산 시간의 단축을 요하는 실시간 대 공정모사기의 개발을 위해서는 모델식에 대한 충분한 해석이 계산 시간과 오차를 줄이는 면에서 중요한 요인이 될 수 있다. 또한 단순화된 식을 사용할 경우 이후에 수반되는 제어시스템의 구성에도 도움을 줄 수 있다.

참고문헌

- [1] I.M.Alatiqi and A.M.Meziou, *Computers chem. Engng*, 16(1),51 (1992).
 [2] 이상용, 김병우, 김무환, 2상유동열전달, 대영사, (1993).

표 1. 보일러 시스템의 사양 및 조업 조건

드럼	내경 : 1m 길이 : 5m		
riser	내경 : 35mm 길이 : 10m 갯수 : 246		
급수 조건	7kg/s,	25atm,	120 °C
증기 사용량	7kg/s,	포화증기	
열 입력량	59.237 kW/m ²		

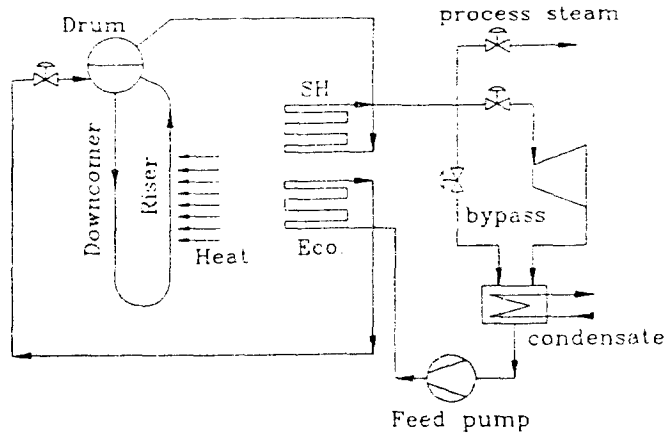


그림 1. 모델을 이용한 간단한 보일러 시스템

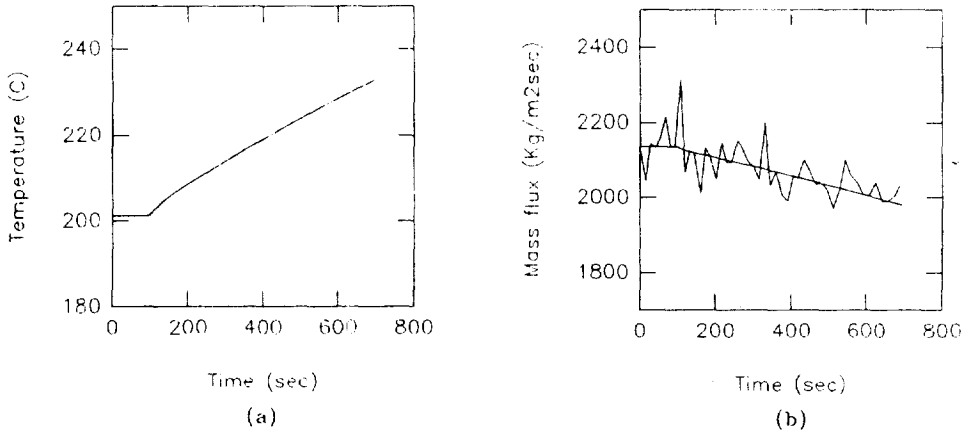


그림 2. 증기 사용량의 10% 감소 변화에 따른 온도와 질량선속의 모사 결과

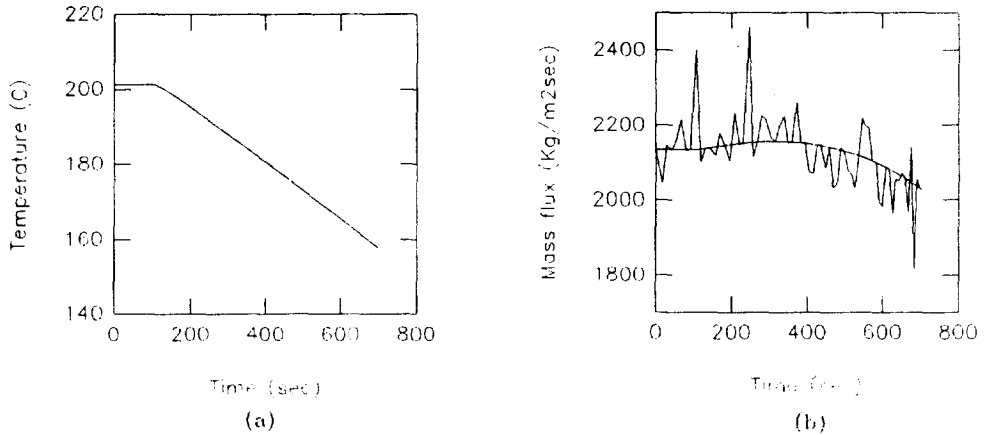


그림 3. 열 입력량의 10% 감소 변화에 따른 온도와 질량선속의 모사 결과