

화력발전소 보일러 제어루프의 시뮬레이션에 관한 연구

이주현, 이찬주
전력연구원, 전력연구원

A Study of Boiler Control Loop Simulation in Thermal Power Plant

J.H.Lee, C.J.Lee
KEPRI, KEPRI

Abstract - In this paper we obtain a discrete mathematical model of a Boiler control system from experimental data. we find appropriate input signal and parameter estimation algorithm for identification of the Boiler control system in power plant. Under these conditions experimental data are collected from real system and parameters are estimated by the Recursive Least Square algorithm. The computer simulation results show the parameter estimation algorithm for identification and the effectiveness of controller design of the Boiler control system.

1. 서론

최근 발전설비의 자동화 범위가 점차 확대되면서 발전소 운전의 핵심적인 역할을 담당하는 제어시스템의 중요성이 한층 더 강조되고 있다. 현재의 발전소 보일러 제어방식은 프로세스 성격에 따라 전체 제어루프의 상태변수들을 근간으로 세부적인 독립된 제어루프별로 제어를 시행하는 개별 루프를 채택하고 있다. 개별 제어루프간의 상호 연결 시스템은 현재로는 상태제환으로 보완된 이득 조정과 함수 발생기 $f(x)$ 를 사용하며, 이때 최적 이득 조정이 되어 있지 않으면 개별 루프의 안정도 뿐만 아니라, 전체 제어루프의 안정도에도 영향을 미친다. 제어기의 최적 이득 조정은 상호 연결된 출력 신호가 개별 루프에서는 오차 신호로 인식되므로 실제 오차가 발생하는 시간 지연과 크기가 고려된 가운데 조정 되어야 한다. 이는 대상 프로세스의 분명한 성격 규명에 의해서만 가능하며, 대상 시스템의 구조, 시간지연, 다른 루프와의 연관성등이 고려된 최적 이득 조정이 이루어져야 한다. 현재 발전소에서 사용하는 PID제어 방식은 각 부시스템들의 상태변수, 출력변수가 다른 부시스템의 선행신호가 되거나 기준신호가 되어 피드백제어, 피드포워드 제어와 캐스케이드 제어 등의 신호로 작용한다. 선행신호와 상태 제환 신호는 다른 부시스템의 상태변수를 측정함에 의하여 결정되며, 상호연결 함수는 경험에 의한 함수 설정에 의해 결정된다.

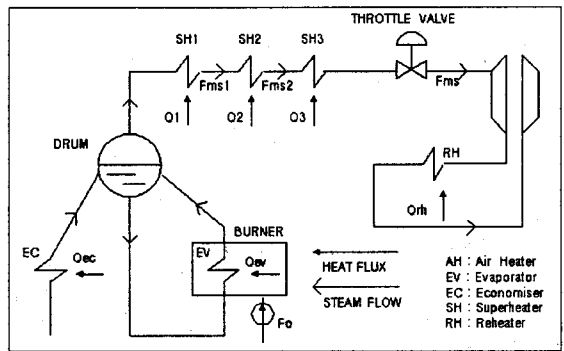
본 논문에서는 화력발전소 보일러 제어시스템에 관하여 기술하고, 발전플랜트의 변수들 사이의 인과관계를 표현하는 신호흐름도와 현장에서 취득한 데이터를 이용한 보일러 온도제어 계통의 모델링 및 제어기의 구성에 관하여 기술하고, 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 제어루프의 모의실험 결과를 통해 제어기의 설계와 제어루프의 효용성을 보이고자 한다.

2. 본론

2.1 대상발전소 보일러 모델

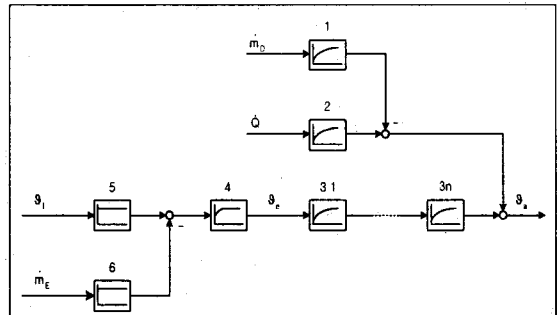
대상 시스템인 여수화력 제1발전소 보일러 플랜트의 모델은 신호흐름도를 이용한 Klefenz의 보일러 모델[1]

를 기본으로 하여 현장의 취득된 운전데이터를 통해 운전중인 시스템의 입력 및 출력신호로부터 시스템을 모델링 하였다. 일반적으로 보일러 모델은 제어기에 맞추어 연소, 급수, 온도제어계통 등 여러개의 서브시스템으로 나누어 질 수 있는데, 본 논문에서는 과열기(Superheater)의 주증기온도 동특성에 대해서만 살펴보기로 하였다. 보일러에서 열전달 및 주증기 동특성에 관한 등가적 모델은 (그림 1)과 같다.[1]



(그림 1) 열전달 및 주증기 동특성에 대한 등가적 보일러

발전소에서 과열기(Superheater)는 드럼으로부터 유입되는 포화증기의 수분을 과열증기(Superheated Steam)로 만든다. 이 과정에서 터빈의 열용량 감소와 저압단에서 습분에 의한 부식을 방지하고, 보일러의 효율향상과 과열기 관의 과열을 방지하기 위해서 증기의 온도를 일정하게 유지해야 한다. 증기의 온도를 제어하는 방법에는 여러 가지가 있겠지만, 일반적으로 발전소에서는 과열기의 입구나 출구측에 과열저감기(Desuperheater)를 설치하여 급수를 과열증기에 분사시켜 증기의 온도를 일정한 범위의 온도로 유지하고 있다. 이러한 특성을 고려해서 모델의 신호 흐름도(그림2)를 구성하면 다음과 같다. [1]



여기서

m_D : Main Steam flow, Q : Heating(연료량)

θ_e : S/H Inlet Temp., θ_a : S/H Outlet Temp.
 θ_1 : Main Steam Temp. m_E : Spray water flow

(그림2) Flow diagram of a steam temp. controlled system (Superheater)

2.2 운전데이터에 의한 시스템 모델링

모델링하고자 하는 구간은 발전기가 계통에 병입되어 출력이 150Mw에서 250Mw까지 증발하는 구간을 대상으로 하였다. 연료량 변화 및 과열저감기의 급수 분사유량의 변화에 주증기의 온도변화를 알아보기 위해 다음과 같은 현장의 실제 운전데이터를 취득하였다.

표 1. 취득한 현장 운전데이터

신 호 명	현장 신호범위	Range (0~100%)	제어카드 위치	비 고
Main Steam Temp.	-10~+10	400~600℃	ST6.16 (7-10-4-II)	
SH Attemp. Out Temp	-10~+10	300~600℃	ST13.5 (8-8-1-13)	
SH Spray Water Flow	1~5	0~30T/H	Bailey 720 (R5,6-45,46)	
출력(Mw)	1~5	0~440Mw	ST6.16 (7-10-4-II)	
Fuel Oil Flow	+10~-10	0~80T/H	CC7.11 (2-8-7-II)	

취득장비는 Advantec사의 Adam5000모델을 사용하여 1초주기로 하였다. 그리고 이들 데이터를 사용하여 모델의 계수를 추정하는 방법은 순환 최소자승법(RLS : Recursive Least Square Algorithm)을 사용하였으며, 플랜트의 차수는 1차의 선형시스템으로 가정하였다. 1차 선형시스템에 대한 모델식은 다음과 같이 표현된다.

$$y(k) = a_1y(k-1) + b_0u(k-1)$$

$$\hat{y}(k) = \hat{a}_1y(k-1) + \hat{b}_0u(k-1)$$

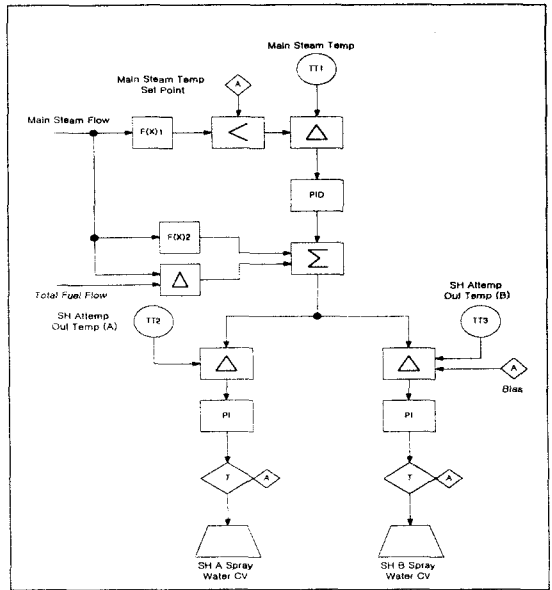
$$J(k) = \sum_{i=0}^k [y(i) - \hat{y}(i)]^2$$

여기서 a_1, b_0 는 실패플랜트 계수이고, \hat{a}_1, \hat{b}_0 는 구하고자 하는 모델의 매개변수이다. $u(k), y(k)$ 는 k번째 순간의 실패 플랜트의 입력과 출력이고, $\hat{y}(k)$ 는 모델의 출력이다. $J(k)$ 는 매개변수를 추정하기 위한 평가함수이다. 본 논문에서는 이 평가함수를 최소화하기 위해 사용한 계산은 MATLAB에서 제공하는 명령어를 사용하여 각 모델의 파라미터를 추정하였다.[2][3]

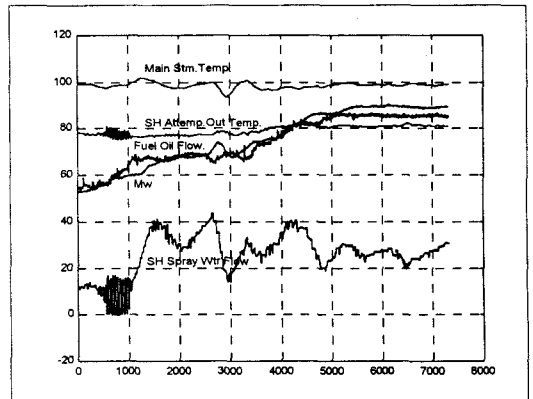
2.3 온도제어기 구성

과열기의 온도제어는 주증기 온도와 설정치의 편차에 의해 동작되는 주제어기의 출력이 부제어기의 설정치가 되고 부제어기는 이 설정치와 과열저감기 출구측 증기온도(TT2, TT3)를 비교하여 그 편차에 따라 과열저감기 급수량을 조절함으로써 주증기 온도(TT1)를 일정하게 유지 한다. 연료량과 주증기량이 증가할때 과열저감기 출구 증기온도와 주증기 온도가 상승하는 것을 방지하기 위하여 연료량/주증기량 변화를 F(x)2에 의해 함수적으로 선행시켜 미리 과열저감기 급수량을 조절하여 주증기 온도 제어 속응성을 높이고 변동폭이 최소가 되도록 한

다.(그림 3 참조)



(그림 3) 주증기 온도제어 로직도(여수화력제1발전소)



(그림 6) 출력변화에 따른 주증기 온도변화 그래프

2.4 모의실험 및 결과

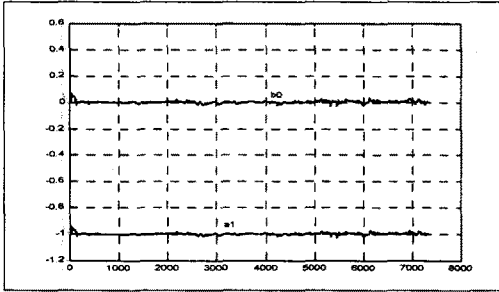
2.4.1 실험 내용

모의실험에서는 현장에서 취득한 제어대상 시스템의 입력 출력 데이터를 통해 모델의 파라미터를 추정하고, 이를 통해 시스템의 전달함수를 구했다. 또한 추정한 모델의 실험결과를 취득한 운전데이터를 사용하여 전달함수의 오차확인을 통해 모델을 검증하였다. 이를 플랜트의 모델로 이용하여 시뮬레이션에 필요한 제어기를 포함한 전체 시스템을 구성하고, 시뮬레이션을 통해 제어기의 최적 파라미터를 구했다. 모든 계산은 Matlab과 Simulink 그리고 Toolbox들을 이용하였으며, 샘플링 시간은 1초로 하였다.

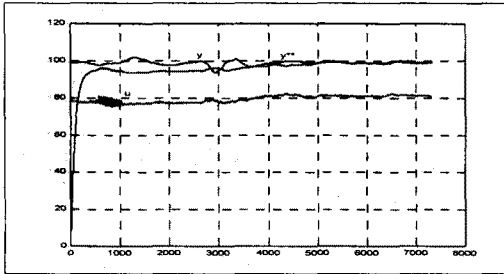
2.4.2 실험 결과

2차 과열기(Process-1)의 전달함수를 구하는 과정에서 a_0, b_1 의 추정 파라미터값은 각각 -0.9884, 0.0142로 (그림 5)는 이를 나타낸 그래프이다. 이를 통해 추정한 매개변수 \hat{a}_1, \hat{b}_0 는 각각 0.0143, 0.0117이며, (그림6)에서 실제값

과 추정값을 보여준다. 동일한 방법으로 Process-2의 전달함수의 구해보면 추정한 매개변수 \hat{a}_1, \hat{b}_0 은 각각 0.0127, 0.0134이고, (그림7)에서 실제값과 추정값을 보여 주고 있다. (그림6)과 (그림7)에서 보면 실제값과 추정한 값과 약간의 오차가 있음을 볼 수 있는데, 이는 매개변수 추정시 하나의 값으로 정착되지 않아 특정구간의 매개변수값을 선택하여 사용한 결과에서 나온 오차와 Discrete 모델식에서 Continuous 모델식으로의 변환과정에서 나온 결과로 보인다.

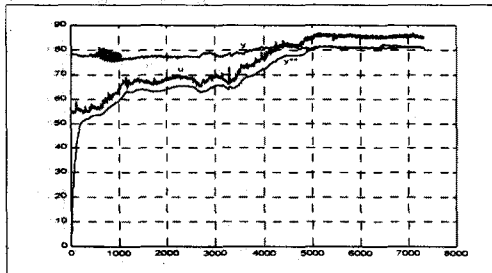


(그림 5) 파라미터 추정 결과값 (Process-1)



u : 입력변수(SH Attemp.Out Temp.)
 y : 출력변수(Main Steam Temp.)
 y** : 추정한 주증기 온도

(그림 6) 과열기(Process-1) 전달특성 추정그래프



(그림 7) 과열기(Process-2) 전달특성 추정그래프

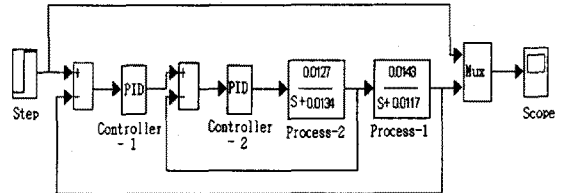
발전플랜트의 온도제어 동특성을 모사한 프로세스의 전달함수를 이용하고, (그림 3)의 온도제어 로직도를 참고하여 시뮬레이션을 위한 등가화된 제어루프를 구성하면 전형적인 캐스케이드 제어형태로 (그림 7)과 같다. 캐스케이드 제어기는 단일루프 제어기에 비해서 내부루프에서 일어나는 외란이 최종 제어변수에 영향을 주기전에 보조제어기에 의해 보정할 수 있어서 내부루프에서 일어나는 부하 외란의 효과를 줄이는데 매우 효과적이다. 모의실험에서 사용한 제어기의 PID 제어기의 알고리즘은

$$U(s) = (K_p + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s)E(s) \text{를 사용하였으며,}$$

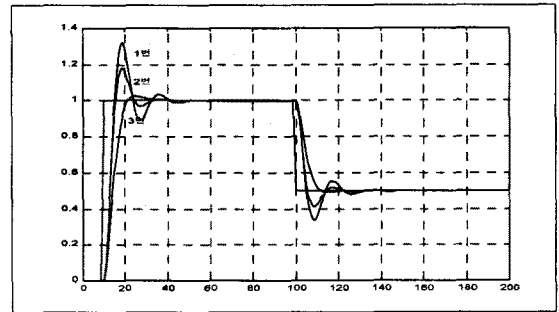
시뮬레이션을 통해 표2의 PID파라미터 및 (그림 8)과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 다양한 파라미터의 변경과 제어기의 구성을 통해 프로세스에 적합한 제어기의 설계와 이를 통해 최적의 PID 제어파라미터를 선정할 수 있었다. (그림8 참조)

표 2, PID파라미터 변경값

	Controller-1	Controller-2	비 고
$K_p/T_i/T_d$	1.5/3.0/0.5	4.0/1.5/1.0	1번(그림8참고)
$K_p/T_i/T_d$	3.0/0.5/1.0	3.0/1.0/0.0	2번(그림8참조)
$K_p/T_i/T_d$	4.0/3.0/0.0	2.0/0.5/0.0	3번(그림8참조)



(그림 7) 제어루프 시뮬레이션 구성도



(그림 8) 제어기 시뮬레이션 결과 그래프

3. 결 론

본 논문에서는 여수화력 제1발전소의 출력변화에 따른 운전데이터를 취득하고, 이를 이용하여 제어시스템을 모델링하였고, 전체특성이 실제 운전데이터와 유사한 결과를 보여 주었다. 모델링 결과를 이용한 모의실험을 통해 제어기의 파라미터를 선정하고, 프로세스에 적합한 제어기의 설계와 그 효용성을 확인하였다. 앞으로 본 논문의 결과와 타 계통의 추가연구를 통해 보일러 제어시스템을 구축할 예정이다.

(참 고 문 헌)

- [1] Dr. Ing.Gunter Klefenz, "Automatic Control of Steam Power Plants" PP. 158-167, 1981
- [2] Lennart Ljung, "System Identification Toolbox for Use with MATLAB", The MATH WORKS Inc., 1993
- [3] 우주희, 김중안, 신윤오, "운전데이터에 의한 가스터빈 발전소의 연료제어 시스템 모델링", Proceedings of the 13th KACC, pp.2019-2022, 1998
- [4] 김재선, "신호흐름도 모델을 이용한 화력발전소 드림형 보일러 시뮬레이터의 개발에 관한 연구".