

화력발전소 관류보일러의 과열기 온도제어에 관한 연구

논문
58-10-29

A Study of Superheater Temperature Control on an Once Through Boiler in Thermal Power Plant

이주현* · 정태원*
(Joo-Hyun Lee · Tae-Won Jeong)

Abstract - An supercritical once through boiler system has been used in the Korea standard-type thermal power plant. It is critical in boiler operation that superheater temperature should be controlled within the specified limit. In this paper, control logic scheme is suggested for superheater temperature in once through boiler. Finally the simulation result using process model based simulator shows the validity of suggested control logic.

Key Words : Thermal Power Plant, Once Through Boiler, Superheater, Temperature Control, Control System

1. 서론

최근 운영되는 신규 화력발전소는 기술의 발달에 힘입어 대용량 및 고효율로 운전할 수 있는 초 임계압 관류보일러가 개발되어 설치 운영되고 있다. 화력발전소에서 보일러는 연료의 연소열을 이용하여 터빈이 필요로 하는 증기를 발생시키는 장치이다. 이러한 증기 발생장치에는 과열기, 재열기 및 절탄기를 포함하는 보일러 본체와 연료를 저장 공급하고 연소 후 생성된 배기가스를 배출시키는 통풍설비, 보일러에 물을 공급하기 위한 급수설비, 보일러 부하 변동에 따른 연료공급 및 급수를 자동적으로 조정하는 자동제어장치와 부속설비로 구성된다. 보일러의 종류에는 자연 및 강제순환 보일러, 관류보일러로 나누어지는데, 표준석탄 화력발전소의 보일러는 일반적으로 초 임계압의 관류보일러가 적용되었다. 관류보일러는 드럼이 없고, 증발관의 구성은 많은 작은 관을 병렬로 배열되어 보일러의 보유수량이 적어 기동시간이 빠르고 부하충동이 양호하여 효율을 높이고, 우수한 동특성 및 신속한 부하 추종성이 있는 장점이 있다[1]. 급수는 보일러 튜브를 1회 통과하는 동안 가열, 증발, 과열되어 출구에서는 과열증기가 되어 배출된다. 발전소의 열효율은 증기압력과 온도를 높임으로서 향상시킬 수 있으나, 증기온도를 높일 경우 사용재료에 대한 온도제한으로 인해 현재 약 538℃-566℃가 일반적인 상한치로 되어 있어서 이에 따른 주증기의 온도제어가 꼭 필요한 실정이며, 최근 과열기 온도 제어 계통에는 진보된 온도제어기법 및 새로운 제어알고리즘들이 연구되고 또한 발전소에 적용되고 있다[2][3][6].

본 논문에서는 먼저 관류보일러의 동특성과 수학적 모델

에 대해 알아보고, 관류보일러에서 증기온도제어의 속응성을 도모하는데 필수적인 일정양의 스프레이를 안정적으로 확보할 수 있는 제어로직과 고정된 PID 제어기의 파라미터를 보일러 주 증기 유량의 변화에 따라 자동으로 게인 값이 변동될 수 있는 제어로직을 제시하였다. 또한 제어검증용 시뮬레이터를 이용하여 부하변동 및 제어 파라미터 변경 등의 모의시험을 통해 제시한 온도제어로직의 효용성과 타당성을 검증하였다.

2. 관류보일러 과열기의 동 특성

관류형 보일러는 드럼이 없고 증발부 내부에서 증발 완료점이 이동한다. 이 경우 보일러 증발량은 연료 투입량이 아니고, 급수 유량에 의해 결정된다. 급수 유량을 일정하게 하고 연료 투입량이 증가하면 포화 영역이 이동하여 과열부가 상대적으로 길게 된다. 결과적으로 보일러 출구 증기 온도는 상승하며 온도 상승에 의한 증기의 체적유량 증가에 따라 주증기 압력은 완만하게 증가한다. 즉 연료의 투입량 변화는 증발 완료점인 포화영역을 이동시켜 그 결과로 과열부를 상대적으로 증감시켜 증기 온도를 증가 또는 감소시킨다. 발전기의 출력이 증가 하는 것은 증기 유량의 증가에 의한 것이 아니라 증기의 엔탈피(Enthalpy) 증가에 의한 것이다. 관류보일러 관출구 열량은 급수유량(kg/hr)에 대한 열입력(kcal/hr)의 비로 결정된다. 어느 압력에서의 증기온도는 엔탈피에 의해 결정되므로 만약 증기압력을 일정하게 할 경우 증기 온도는 열입력과 급수유량의 비로 결정된다. 따라서 정상운전 상태에서 관에 유입되는 급수량과 출구의 증기 유량을 같게 유지한다면 압력을 회피하는 어느 값으로 유지할 수 있고 증기온도는 급수유량에 따라 연료, 공기의 열입력의 비를 일정하게 함으로써 가능하다. 그림 1은 관류형 보일러의 과열기 및 과열기 온도저감기(Spray Valve) 계통의 동 특성을 나타낸다. 보일러의 증발부를 지나게 되면 증기온도는 상승하게 되고, 과열기의 온도저감기를 통과하게 되면 온도가 떨어지게 된다. 다시 과열부를 지나면서 주증기의 온도는 상승하게 된다[4].

* 교신저자, 정태원 : 한국전력공사 전력연구원 책임연구원
E-mail : jhlee@kepeco.co.kr

* 정 회 원 : 충남대학 전기공학과 교수·공박
접수일자 : 2009년 8월 24일
최종완료 : 2009년 9월 7일

※ 본 논문은 본 학회 2009년 하계학술대회 학술위원회에서 우수논문으로 선정되어 편집위원회 심사 후 본 논문에 게재 되었음.

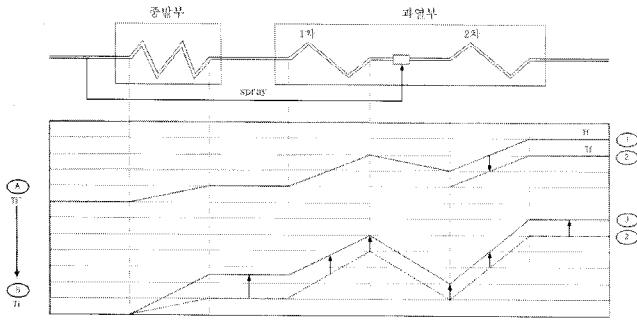


그림 1 관류보일러 과열기 및 온도저감기 동 특성
Fig. 1 Dynamic characteristic of superheater model

2.1 과열기의 수학적 모델(Mathematical Model)

그림 2는 과열기 계통의 개략도를 나타내며, 전체적인 열 평형과 증기의 흐름, Flue Gas에 의한 열전달을 고려하여 플래튼 과열기(Platen Superheater)와 최종과열기(Final Superheater)의 수학적 모델식을 도출하면 식 (1)과 같다[4].

$$\frac{d}{dt} T_{out} = K_2 (K_1 \dot{m}_{fuel} + \dot{m}_{in} (T_{in} - T_{out} + B_1) + B_2) \quad (1)$$

$$(K_1 = \frac{H}{C_p}, K_2 = \frac{1}{\rho_s \cdot V_s}, B_1 = \frac{k_a}{C_p}, B_2 = k_0 \rho_s \cdot V_s)$$

Parameter	Nomenclature	Parameter	Nomenclature
$T_{in, out}$	Inlet, outlet steam temperature	ρ_s	Specific density of steam
\dot{m}_{in}	Inlet steam flow	C_p	Specific heat
\dot{m}_{fuel}	Fuel(coal) flow	V_s	Volume of steam
H	Calorific value	k_a, k_0	Expansion coefficient

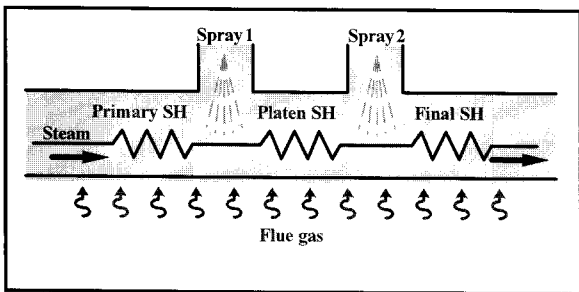


그림 2 과열기 계통 개략도
Fig. 2 Superheater model overview

그림 3은 과열 저감기(Spray 1, 2)에 대한 개략도를 나타내며, 이에 대한 수학적 모델식을 도출하면 식 (2)와 같다.

$$T_{out} = \frac{\dot{m}_{in} T_{in} + \dot{m}_{spray} T_{spray}}{\dot{m}_{out}} \quad (2)$$

Parameter	Nomenclature	Parameter	Nomenclature
T_{in}	Inlet steam temp.	\dot{m}_{in}	Inlet steam flow
T_{out}	Outlet steam temp.	\dot{m}_{out}	Outlet steam flow
T_{spray}	Spray water temp.	\dot{m}_{spray}	Spray water flow

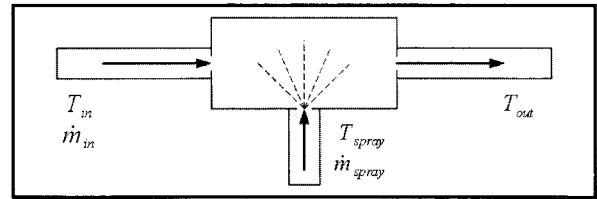


그림 3 과열 저감기 개략도
Fig. 3 Superheater spray overview

2.2 관류보일러의 급수 및 증기 흐름

급수펌프에 의해 공급된 급수는 절탄기(Economizer), 증발기(Evaporator), 행거 튜브(Hanager Tube), 1차 과열기(Platen Superheater), 최종 과열기(Final Superheater)를 거쳐 고압 및 중압 터빈을 구동시킨다. 고압 및 저압터빈을 거쳐 온도 및 압력이 저하된 과열증기는 1차 재열기(Primary Reheater)와 최종재열기(Final Reheater)를 거쳐 주증기와 같은 온도로 승온되어 저압 터빈을 구동시킨다. 이 때 최종 과열기의 온도 설정치는 541℃이며, 과열기는 온도조절을 위해 1차과열기와 최종과열기 전단에 각각 온도저감기(Spray Valve)가 설치되어 있고, 재열기는 1차와 최종 재열기 중간에 온도저감기가 설치되어 있다. 온도 저감기에 공급되는 급수는 주증기와 재열기 온도저감기가 각각 급수 펌프의 최종단과 중간단에 연결되어 공급되고 있다. 아래 그림 4는 관류보일러에서 급수와 증기의 흐름도를 나타내고 있다.

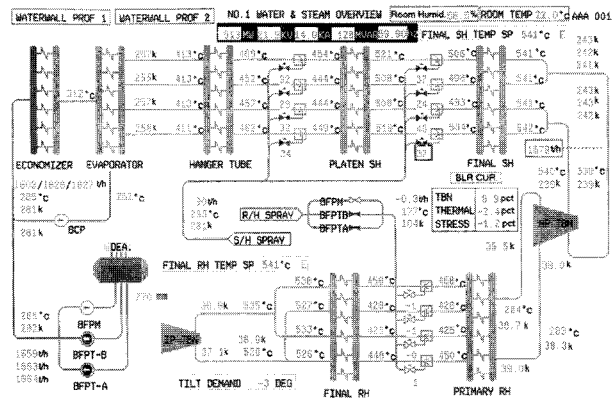


그림 4 관류보일러의 급수와 증기의 흐름도
Fig. 4 Flow diagram of feed water and steam

2.3 과열기 온도제어 개요 및 구성

관류보일러의 증기온도는 급수(Feed Water) 유량과 연료(Fuel)의 비율에 따라 Balance Point가 결정된다. 관류보일러

러의 증기온도제어는 크게 연료와 급수량의 비를 조절하는 방법과 온도저감기를 이용하여 조절하는 방법으로 나누어진다. 연료와 급수량의 비를 조절하는 수연비 제어에서는 온도설정 값에 일정량(약 16~22°C)의 온도편차 신호를 가감하여 관류보일러의 특성상 필요한 급수유량의 일정비율을 확보한다. 과도상태나 부하 정정상 상태에서 지속적으로 온도제어를 하는 수연비 제어와 다르게 과열기 전단의 온도 저감기에 의한 주증기 온도 제어는 일시적이긴 하지만 응답 특성이 우수하기 때문에 증기온도 외란이 과도 할 경우 제어에 효과적이다. 보일러의 안정적 운전을 위해서는 연소량과 급수량의 비율을 적절히 맞추는 동안 온도저감기 제어와 긴밀히 협조하여 주증기 온도의 편차가 최소가 되도록 하는 것이 필요하다. 그림 5는 과열기 온도 제어로직의 구성도를 나타내며, 가운데 부분의 2번이 수연비 제어를 담당하는 제어로직을 나타내며, 왼쪽의 1번은 1차과열기, 오른쪽 3번은 최종과열기의 스프레이 온도제어밸브의 개도를 조절하여 증기온도를 조절하는 제어로직의 구성도를 나타낸다.

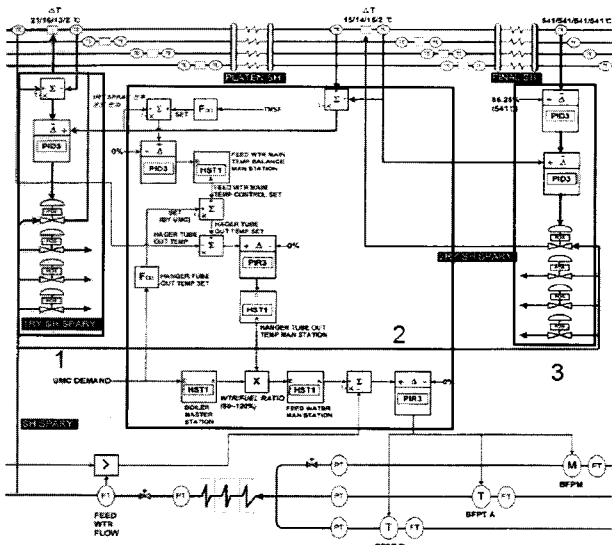


그림 5 관류보일러 증기 온도제어 구성도
Fig. 5 Superheater temperature control overview

2.4 과열기 온도제어 로직

위에서 언급한 보일러 과열기의 온도제어의 방법 중에 본문에서는 우선 스프레이 제어밸브를 통한 온도제어 방법에 초점을 맞추어 설명하였다. 보일러 정격 운전 중에 부하 변동에 따른 과열기 출구 온도의 목표 값이 기준 값으로 주어진다. 이 기준 값은 정상 운전 중에 외부로부터 수없이 많은 외란으로 인한 부하 증 감발시 변화되는 실제온도와 비교하여, 목표 온도 값과 실제 온도 값이 비교되어 온도 제어기에 입력되면 이 제어기는 비교된 최종 온도 값이 목표치보다 높으면 온도제어 밸브를 열라고 명령을 내리며 반대로 목표치보다 낮으면 닫으라는 명령을 내린다. 이와 같이 온도 설정값에 도달하도록 과열기 스프레이 온도제어 밸브의 개도를 조정하는 방법으로 과열기 출구 측 증기 온도를 제어한다. 그림 6은 일반적인 최종과열기 온도제어 로직의 개념도를 나타낸다. 최종과열기 온도제어는 Cascade 제어방식

이며, 1차-PID 제어기(Final SH Outlet Controller)의 출력 값이 피드포워드 신호와 합산되어 2차 제어기(De-superheater Outlet Controller)의 설정값으로 입력된다. 이 신호는 실제 온도(De-superheater Outlet Temp.)와 비교하여 편차를 발생하고 PID 제어 동작을 통해 최종 스프레이 온도제어 밸브의 동작 요구 신호로 보내어 진다. 그림 7은 발전소 보일러의 Platen 과열기 및 최종 과열기 온도제어 로직의 구성(예)를 나타낸다.

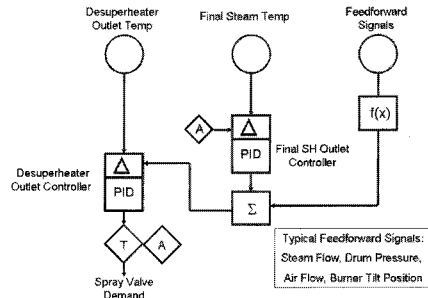


그림 6 최종과열기 온도제어로직 개념도
Fig. 6 Superheater temperature control logic scheme

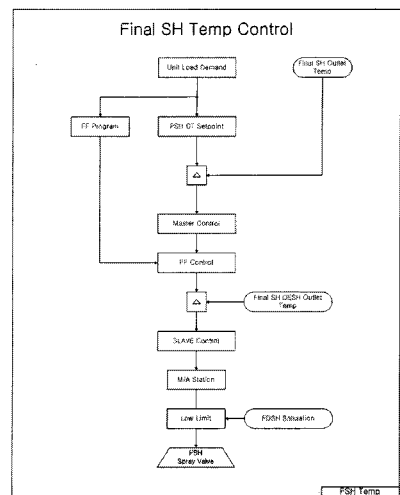
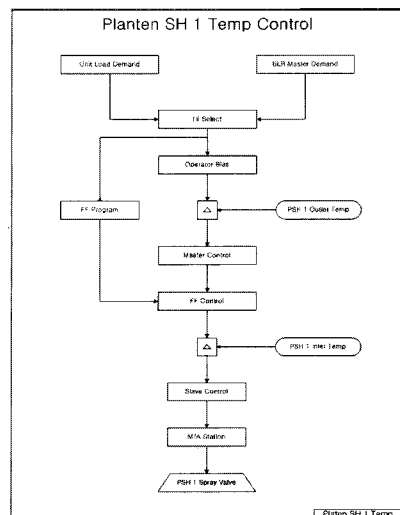


그림 7 과열기 온도제어로직 구성(예)
Fig. 7 Superheater temperature control logic

2.5 제안한 과열기 온도제어 로직

2.5.1 적정 스프레이 유량 확보위한 로직 구현

기존의 드럼형 보일러와는 다르게 관류형 보일러에서는 수관으로 유입된 보일러수가 전부 증발되도록 설계되어 증기온도 제어의 속응성을 도모하는데 일정양의 스프레이 양의 안정적인 확보가 필수적이다. 적정 스프레이 유량의 확보하는 방식은 급수제어 요구량에 스프레이 분을 감하는 방법이 있는데[5], 본 논문에서는 수연비 제어에서 Hanger Tube 온도제어 설정값에 최종과열기 온도저감기 전후의 온도차를 16~22℃로 유지하는 보정회로를 넣어 급수유량 제어에서 스프레이 총량을 확보하는 방법을 제안하였다. 1차 과열기 온도제어의 설정값은 1차 과열기 출구온도와 최종 과열기 입구온도의 편차(2차 온도저감기 전후의 온도차)로 설정되며, 실제온도 제환 신호는 Hanger Tube 출구온도와 Platen Superheater 입구온도의 편차(1차 온도저감기 전후의 온도차)가 입력된다. 본 논문에서 제안하는 이와 같은 온도차(ΔT)를 이용하는 제어 방법은 1차 과열기와 최종과열기의 온도제어를 위한 스프레이의 비율을 일정하게 유지하는데 유효한 방안이다. 그림 8은 온도차를 이용하여 적정 스프레이 유량확보를 위한 수연비 제어의 실제 구현 로직을 나타낸다.

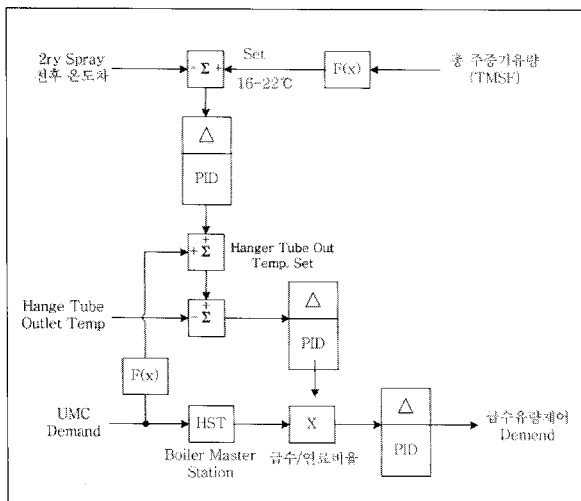


그림 8 적정 스프레이 유량확보를 위한 실제 구현 로직
Fig. 8 Implementation of control logic for spray flow

2.5.2 부하변화에 따른 가변게인 설정 로직

일반적으로 비례적분미분(PID) 제어기의 비례게인(Kp)이나 적분시간(TN)의 값은 하나의 상수 값으로 주어진다. 본 논문에서 사용된 제어로직의 PID 제어기 출력 식은 식 (3)과 같다.

$$F(s) = K_p \cdot \frac{1 + T_n \cdot s}{T_n \cdot s} \cdot \frac{1 + T_v \cdot s}{1 + T_1 \cdot s} \quad (3)$$

여기서 Kp는 비례상수, Tn은 리셋시간, Tv는 미분시간 그리고 T1은 지연시간을 나타낸다.

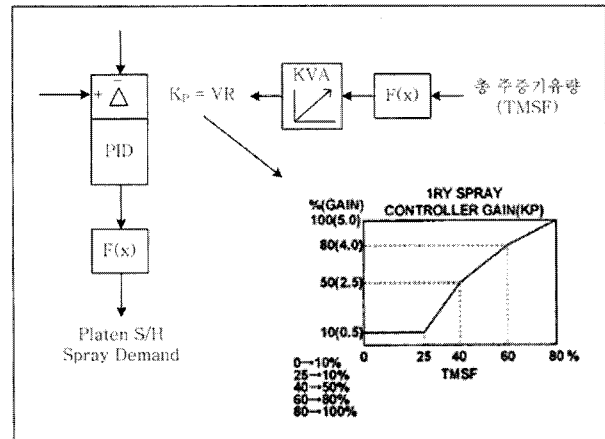


그림 9 부하변화에 따른 제어기의 가변게인 설정로직
Fig. 9 Gain scheduling logic based on load

본 논문에서 제안된 관류보일러 온도제어 로직에서는 비례동작의 게인 값이 부하변화에 따른 주 증기유량(Main Steam Flow)에 적절한 게인 값으로 변경된다. 그림 9의 곡선에서 보듯이 주 증기 유량이 전체 유량의 40%일 경우는 PID제어기의 게인 Kp는 2.5이며, 주 증기유량이 60%일 경우 Kp 4.0으로 자동으로 변경된다. 효율적인 온도제어가 가능하도록 최적으로 정정(Tuning)된 제어상수들은 시운전 과정을 거쳐 결정된다. 부하변화에 따른 PID 제어기의 가변게인의 설정은 운전원이 부하에 따라 적절한 설정 값을 수동으로 변경하여야 하는 어려움과 그에 따라 설정 값이 정밀하게 변경되지 못하여 주증기 분사유량을 최적으로 제어하지 못하는 문제점을 해결할 수 있는 장점이 있다.

3. 시뮬레이터를 이용한 모의시험

3.1 시뮬레이터 및 모의시험 내용

온도제어시스템의 모의시험을 위한 시뮬레이터는 그림 10과 같은 프로세스 모델 기반의 Ovation사에서 제공된 시뮬레이터를 이용하여 모의시험을 수행하였다. 시뮬레이터는 화력발전소 프로세스의 모델이 내장되어 있으며, 과열기 온도제어를 포함한 보일러 제어와 관련된 로직들은 프로그램화 되어 디지털 분산제어 시스템(DCS : Distributed Control System)에 내장되어 있다. 시뮬레이터를 이용한 모의시험의 주요 내용은 부하의 변화(1000→800→1000MW)에 따른 제어기 출력과 스프레이 제어밸브 개도요구량, 이에 따른 과열기 입 출구 온도의 변화를 시험하였다. 두 번째는 Platen 및 최종과열기에서 온도설정 값의 변화에 따른 제어기 출력, 스프레이 제어밸브 개도 요구량과 온도변화를 시험하였다. 마지막으로 부하가 고정된 상태에서 스프레이 제어밸브의 개도를 25%에서 75%로 변경하였을 때 제어기 출력에 따른 온도변화를 시험하여 본 논문에서 제안한 온도제어로직의 효용성과 타당성을 검증하였다.

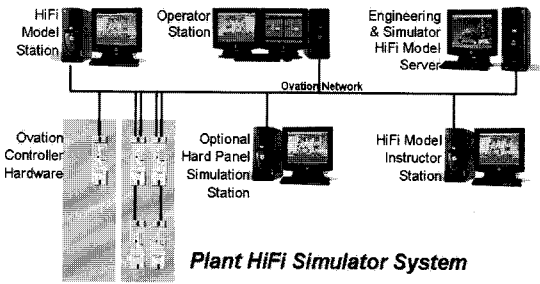


그림 10 프로세스 모델기반의 시뮬레이터
Fig. 10 Process model based simulator

국내 화력발전소의 시운전 및 준공단계에서 부하 변동에 따른 주 증기 및 재열증기 온도변화를 가지고 성능을 입증 하도록 되어 있다. 표 1은 국내 표준석탄 화력발전소인 당진화력발전소의 성능보증 계약 조건을 나타낸다[2].

본 논문에서는 시뮬레이터를 이용한 모의시험 결과 부하 변화(Load Swing)의 경우는 아래의 조건에 만족하는지의 여부를 가지고 제어로직의 효용성을 확인하였다.

표 1 발전소 성능보증 계약조건(예)

Table 1 Condition for performance guaranty

운전상태	주증기 온도변화		재열증기 온도변화		비 고
	온도(°C)	시간(Sec)	온도(°C)	시간(Sec)	
부하 고정 시	±3	-	±3	-	
30~40%NR	±12	1200	-	-	3% NR/Min
50% 이상	±8	900	±8	1200	5% NR/Min
Step Change 50% 이상	±10	900	±10	1200	10초내에 10% 변화
GOV Free	±8	-	±8	-	±3

3.2 모의시험 결과 및 고찰

프로세스 모델 기반의 시뮬레이터를 이용하여 모의시험 한 결과는 다음과 같다.

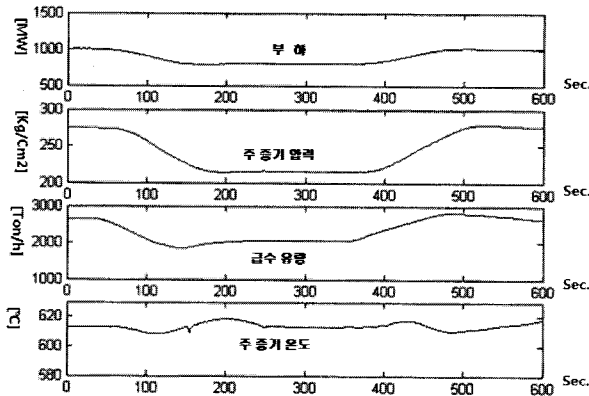


그림 11 부하변화(1000→800MW)에 따른 온도변화
Fig. 11 Trend for load swing test in final S/H

그림 11는 부하변화에 따른 주증기 온도변화를 나타낸다. 부하를 1000→800→1000MW로 변동하였을 때 주증기 온도의 변화는 613°C를 기준으로 609°C에서 618°C까지 ±5°C 이내로 ±8°C의 기준을 만족하는 결과로 양호한 특성을 나타냄을 확인하였다.

그림 12은 Platen S/H의 온도설정값 변화에 따른 온도변화를 나타낸다. 설정값을 533°C에서 543°C로 10°C를 높였을 때 제어기 출력에 따른 스프레이 제어밸브의 개도요구량과 Platen S/H의 입구 및 출구의 온도변화를 나타낸다. 온도설정치를 높였을 때 제어기의 출력에 따라 스프레이 제어밸브의 개도가 닫혔고, 보일러의 시정수에 맞게 일정시간 뒤에 온도설정 값으로 안정적으로 온도가 상승함을 확인하였다.

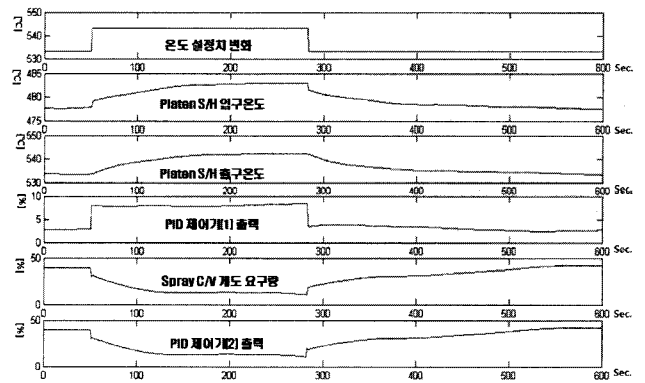


그림 12 Platen S/H 설정값 변화에 따른 온도변화
Fig. 12 Trend for set point change in Platen S/H

그림 13은 발전기 출력을 603MW로 고정하고 최종과열기의 스프레이 제어밸브의 개도요구량을 25%에서 75%로 올렸을 때 PID제어기의 출력과 이에 따른 최종과열기의 온도변화를 나타낸다.

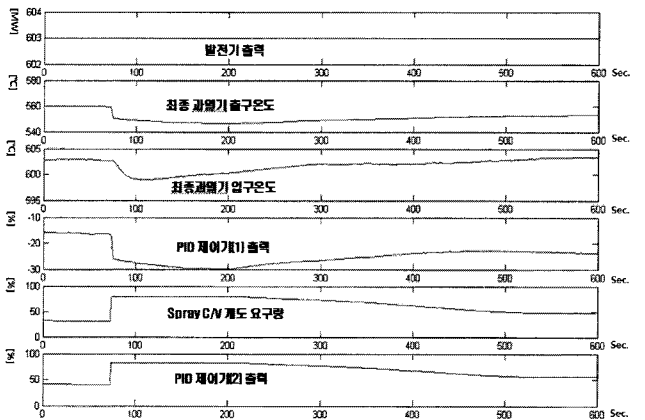


그림 13 Spray C/V 개도변화(25→75%)에 따른 온도변화
Fig. 13 Trend for Spray VV step test

그림 14는 온도 설정 값 변화에 따른 최종과열기의 온도 변화를 나타낸다. 설정 값을 603℃에서 613℃로 10℃를 높였을 때 제어기 출력에 따른 스프레이 제어밸브의 개도 요구량과 최종과열기의 입구 및 출구 온도변화를 나타낸다.

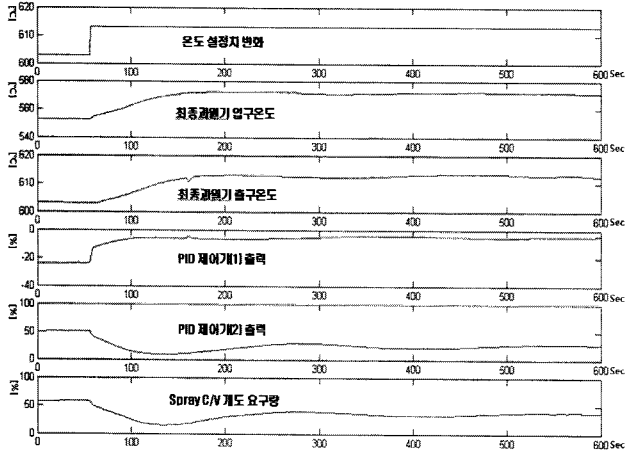


그림 14 최종과열기(Final S/H)의 온도변화
Fig. 14 Trend for set point change in Final S/H

3. 결 론

보일러 출구 증기온도를 정격치 이내로 운전하는 것은 보일러 운전에 있어서 매우 중요한 요소이다. 본 논문에서는 관류보일러 온도제어에서 필요한 일정량의 스프레이를 안정적으로 확보할 수 있는 제어로직과 고정된 PID 제어기의 파라미터를 보일러 주 증기 유량의 변화에 따라 자동으로 게인 값이 변동될 수 있는 제어로직을 제시하였다. 또한 프로세스 모델기반의 시뮬레이터를 이용하여 부하변동 및 제어 파라미터 변경 등의 모의시험을 통해 온도제어로직의 효용성과 타당성을 검증하였고, 아래와 같은 결과를 얻었다.

[1] 보일러 프로세스 모델기반의 시뮬레이터를 이용하여 부하의 변화(1000→800→1000MW)에 따른 온도제어 계통의 모의시험 결과 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 이내로 $\pm 8^{\circ}\text{C}$ 의 기준을 만족하는 결과를 얻었다.

[2] 최종과열기와 Platen S/H에서 온도 설정 값과 스프레이 제어밸브의 개도요구량 변화 등의 모의시험을 통해 제어기의 출력과 제어밸브 개도요구량의 변화에 따라 온도 설정 값으로 과열기 입구 및 출구의 온도가 변동되어 안정적으로 제어가 잘 수행되어 제어로직의 효용성을 확인하였다.

[3] 보일러의 급수량과 연료량의 비율로 증기온도를 제어하는 수연비 제어에서 본 논문에서 제시된 온도편차를 이용한 제어로직의 구성은 발전소의 실 계통에서도 활용되고 있고, 관류보일러에서 필요한 일정비율의 적정 스프레이 유량을 안정적으로 확보할 수 있는 효과적인 방법이라 사료된다.

[4] 부하변화에 따른 PID 제어기의 가변적으로 게인을 설정할 수 있는 제어로직을 제시함으로써 운전원이 부하에 따라 적절한 설정 값을 수동으로 변경함에 따라 설정 값이 정밀하게 변경되지 못하는 문제점을 해결하여 과열기 온도제어를 위한 분사유량을 최적으로 제어할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부에서 지원하여 수행중인 전력산업연구개발사업의 연구개발 결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] 이주현, 임익현, 정태원 “화력발전소 관류보일러 온도제어에 관한 연구”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.1666~1667. 2009.
- [2] Tommy Moelbak, “Advanced control of superheater steam temperatures an evaluation based on practical applications”, Control Engineering Practice 7, 1~10. 1999.
- [3] A. Buschini, L. Ferrarini, C. Maffezzoni. “Self-tuning Cascade Temperature Control”, Proceedings of the Third IEEE Conference, Vol.1, Page 753~758, 1994.
- [4] 김호열 외 “차세대 화력발전 설계기술 개발 진도보고서”, 전력연구원, 2007
- [5] 임익현 외 “통합감시 제어시스템 성능검증 및 실증 시험 개발 진도보고서”, 전력연구원, 2007
- [6] 이광훈, 이주현 “500MW급 초임계압 관류형 보일러 온도제어에 대한 기술”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 1998.

저 자 소 개



이 주 현 (李 柱 鉉)

1964년 2월 1일생. 2000년 홍익대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년~현재 충남대 대학원 전기공학과 박사과정, 1993년~현재 한전 전력연구원 책임연구원

Tel : 042-865-5643

Fax : 042-865-5609

E-mail : jhlee@kepeco.co.kr



정 태 원 (鄭 泰 媛)

1948년 1월28일생. 1970. 2월 전북대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1984. 8월 연세대학교 대학원전기공학과 졸업 (공학박사). 1976. 5월-현재 충남대학교 공과대학 전기공학과 교수

Tel : 042-821-5653

Fax : 042-821-8895

E-mail : twjeong@cnu.ac.kr