

## The Steam Temperature Control of Renovated Boiler in 100MW Power Plant

임 건 표<sup>†</sup> · 이 흥 호<sup>\*</sup>  
(Geon-Pyo Lim · Heung-Ho Lee)

**Abstract** - The control logic of steam temperature was redesigned, tested and applied to the power plant after its steam temperature equipments had been revised. This power plant use the ancillary gas gotten in the process of making iron in the steel mill. The boiler of power plant has the superheater and reheater to make the superheated steam. The superheater and reheater have the spray valve to control their temperature. The reheater has the gas bypass damper additionally in this plant. The control logics were redesigned in cascade forms and the initial parameters of control logics were calculated from the several step tests. The final parameters could be obtained through the several repeated tests and the feedforward functions were added by temperature deviation and air flow. The power plant is being commercially-operated normally by improved control logics and It is expected that this improved controls help the efficiency improvement and safe operation of plant.

**Key Words** : Temperature, Control, Plant

### 1. 서 론

본 논문은 제철소에서 발생하는 부생가스를 공급받아 전기를 생산하는 발전소의 증기온도 관련설비개조에 따라 관련 제어로직을 재설계하여 시험하고 적용한 내용이다.

그림 1은 대상 발전소의 증기 발생기 계통으로 급수펌프에 의해 보일러에 공급된 급수가 과열기를 거쳐 터빈을 회전시킨 후 다시 보일러의 재열기를 거쳐 터빈을 회전시키도록 구성되어 있다. 과열기와 재열기 중간에 설치된 스프레이로 온도상승을 억제하도록 제어한다. 과열기는 보일러에 공급된 연료의 연소열로 공급된 급수를 터빈을 회전시키기 적합한 과열증기로 만드는 역할을 한다. 과열증기가 터빈을 회전시킨 후 과열도가 떨어지면 터빈을 손상시킬 수 있으므로 재열기에서는 다시 과열도를 높이는 역할을 한다.

대상 발전소는 과다하게 설계된 과열기 열부하를 감소시키기 위해 계획예방정비공사시 과열기 전열면적을 일부 제거하고 조정하였다. 또한 재열기 온도 제어를 개선하기 위하여 재열기 온도제어루프에 사용하는 재열기 온도센서를 1차 재열기와 최종 재열기 헤더 중간에 추가로 설치하였다. 이에 따라 과열기와 재열기의 온도조절에 대한 제어시스템을 재설계하고 이를 적용하기 위한 시험을 수행하였다.

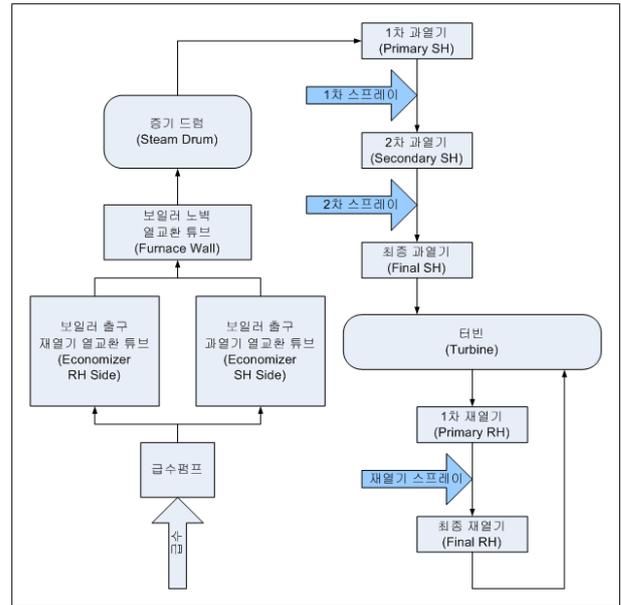


그림 1 대상 발전소의 증기 발생기 계통  
Fig. 1 The steam generator system of power plant

재열기 온도제어 설계개념은 보일러 출구 재열기 열교환 튜브측에 설치된 가스바이패스 댐퍼가 재열기 온도제어를 1차적으로 수행하고 제어범위 초과시 재열기 스프레이가 열리도록 구성되어 있다.

발전연료로 제철소의 부생가스를 공급받기 때문에 제철소 운영여건에 따라 수시로 제한된 공급이 불가피하며 협조제어 모드 운전이 어려운 상황이다. 발전소의 일반적인 제어

\* 정 회 원 : 충남대 공대 전기공학과 교수  
† 교신저자, 정회원 : 한국전력공사 전력연구원 선임연구원  
E-mail : kepcolime@kepcoco.kr  
접수일자 : 2011년 7월 14일  
최종완료 : 2011년 9월 20일

개념으로는 보일러 압력과 발전기 출력에 의한 협조제어가 주가 되고 있으나, 대상 발전소의 경우 연료 공급에 맞춰 보일러와 터빈을 안정하게 운전할 수 있도록 제어하고 있다.

## 2. 본 론

### 2.1 제어로직 설계

#### 2.1.1 과열기 1차 스프레이 제어로직 설계

그림 2는 과열기 1차 스프레이(Primary Spray) 제어로직 구성을 간략히 나타내었다.

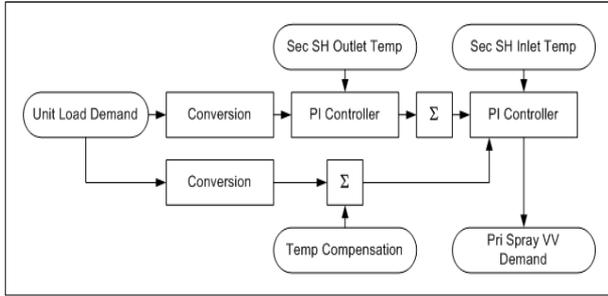


그림 2 과열기 1차 스프레이 제어로직 구성도  
 Fig. 2 The configuration of control logic of superheater primary spray

위쪽의 외부루프 PI 제어기가 주제어기(Primary Controller), 아래쪽 내부루프 PI 제어기가 부제어기(Slave Controller)로 캐스케이드 제어방식을 사용하였다. 주제어 대상이 과열기 출구 온도이기 때문에 위쪽 PI 제어기가 주제어기가 된다. 과열기 출구온도는 백동의 허용치가 엄격하여 계단 형태의 전력요구신호에 의한 외란에 대해서도 출구온도가 잘 안 변하는 PI제어기가 요구된다. 캐스케이드 제어를 사용한 이유는 밸브의 동작과 온도변화 사이에 큰 폭의 불감대와 시정수가 존재하기 때문이다. 발전기 출력요구신호(Unit Load Demand)에 따른 2차 과열기 출구의 온도를 설정하고 이를 제어하기 위한 2차 과열기 입구온도 조절을 위한 선행제어를 구성하였다. 발전기 출력요구신호는 최상위 제어신호이므로 이 신호에 의해 보일러에 공급되는 연료, 급수, 공기 유량이 결정되고, 이에 따른 온도변화를 스프레이 밸브가 제어하게 되므로 미리 제어오차를 제거하기 위해 선행제어를 구성하였다.[1][3][5][6]

#### 2.1.2 과열기 2차 스프레이 제어로직 설계

그림 3은 과열기 2차 스프레이(Secondary Spray) 제어로직 구성을 간략히 나타내었다. 위쪽 PI 제어기가 주제어기, 아래쪽 PI 제어기가 부제어기로 캐스케이드 제어형태로 구성하였다. 발전기 출력요구신호에 따른 최종 과열기 출구의 온도를 설정하고 이를 제어하기 위한 최종 과열기 입구온도 조절을 위한 선행제어를 구성하였다. 최종 과열기 출구의 증기는 주증기 압력(MSP, Main Steam Pressure)에 바로 영향을 주므로 주증기 압력 설정값과 실제 압력과의 편차(MSP Error)를 최종과열기 입구 온도 설정값에 피드포워드로 사용하기 위해 합산하였다.

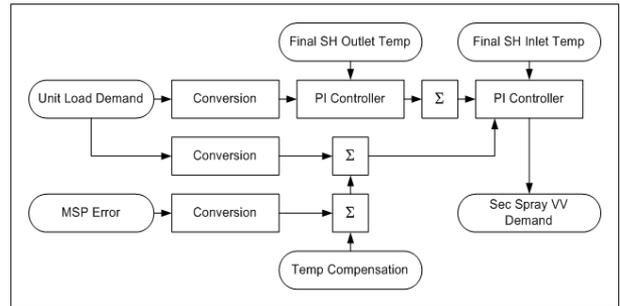


그림 3 과열기 2차 스프레이 제어로직 구성도  
 Fig. 3 The configuration of control logic of superheater Secondary spray

#### 2.1.3 재열기 스프레이 제어로직 설계

그림 4는 재열기 스프레이와 가스댐퍼 제어로직 구성을 간략히 나타내었다. 위쪽 PI 제어기가 주제어기, 아래쪽 PI 제어기가 부제어기로 캐스케이드 제어형태로 구성하였다. 발전기 출력요구신호(Unit Load Demand)에 따른 최종 재열기 출구의 온도를 설정하고 이를 제어하기 위한 최종 재열기 입구온도 조절을 위한 선행제어를 구성하였다.

보일러 출구 재열기 열교환 튜브측에 설치된 가스 댐퍼는 발전기 출력요구신호에 따른 최종 재열기 출구의 온도를 설정하고 실제 온도를 피드백 받아 PI 제어를 하도록 했으며 재열기 가스 댐퍼는 전체 가스량 100%에 대해 과열기 가스 댐퍼의 개도를 뺀 개도를 제어하도록 하였다. 보일러 출구 가스량은 보일러 입구측에 공급하는 총 공기유량에 의해 결정되므로 좀 더 신속한 응답을 위해 총 공기유량에 의한 선행제어 신호를 PI 제어기 출력에 합산하여 제어하도록 하였다.

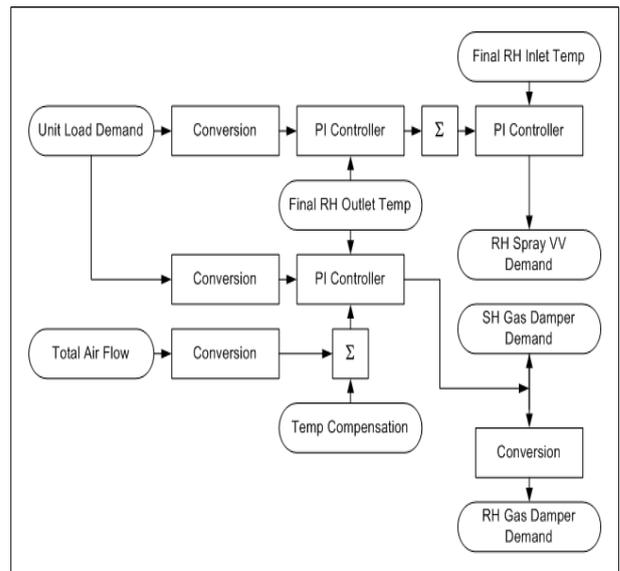


그림 4 재열기 스프레이 및 가스댐퍼 제어로직 구성도  
 Fig. 4 The configuration of control logic of reheater spray and gas damper

## 2.2 시험 및 조정

### 2.2.1 시험 방법

스프레이 제어밸브(Spray Control Valve)의 제어로직 변수를 조정하기 위한 시험방법은 다음과 같다. 스프레이 제어밸브 제어로직을 수동모드에 놓는다. 프로세스가 충분히 안정될 때까지 충분히 기다린 후 프로세스가 안정되면 제어기 출력을 받아들일 수 있는 크기와 방향을 판단해서 계단 응답시험(5~10%)을 한다. 계단응답시험에 의한 변화가 안정될 때까지 기다린 후 그 결과로부터 변수 설정값을 계산한다.

캐스케이드 제어에서는 1차 루프보다 2차 루프를 먼저 조정해야 한다. 설정가능한 비례이득의 최대값, 적분시간의 최소값을 사용한다.[2][3]

식(1)~(4)는 지글러-니콜스 개방루프 튜닝방식과 유사한 형태이며, 실제 대상 발전소에서 사용한 방식이다. 지글러-니콜스 개방루프 튜닝방식의 경우 PI제어기에 대해 식(1)의 0.9배를 비례이득으로 사용하고, 식(2)의 경우 적분시간은 5배가 아닌 3.33배를 사용하고 있다.[4]

2차 PI 제어기의 변수 설정값을 계산하는 방법은 다음과 같다.

$$P\ Gain = \Delta V \div \Delta T_{in} \quad (1)$$

$$I\ Time = 5 \times DT_{in} \quad (2)$$

단,  $P\ Gain$ 은 제어기비례이득  
 $I\ Time$ 은 제어기 적분시간(초)  
 $\Delta V$ 는 계단응답시험의 밸브 변화(%)  
 $\Delta T_{in}$ 은 입구온도변화(°C)  
 $DT_{in}$ 은 입구온도변화 Dead Time(초)

1차 PI 제어기의 변수 설정값을 계산하는 방법은 다음과 같다.

$$P\ Gain = \Delta T_{in} \div \Delta T_{out} \quad (3)$$

$$I\ Time = 5 \times DT_{out} \quad (4)$$

단,  $\Delta T_{out}$ 은 출구온도변화(°C)  
 $DT_{out}$ 은 출구온도변화 Dead Time(초)

식(1)~(4)를 이용하여 변수 설정 초기값을 계산하여 적용한 이후 몇 차례 반복시험을 통해 최적 변수 설정값을 얻을 수 있다.

### 2.2.2 과열기 1차 스프레이 제어밸브 제어로직 시험 및 조정

그림 5는 과열기 1차 스프레이 제어밸브를 6.5% 열면서 계단응답시험한 결과이다. 그림 5의 결과 및 식 1~4에 의해 얻은 P Gain과 I Time은 각각 0.54, 63, 1.0, 295이다.

만약 동일 시험을 두 번 이상 수행할 경우 각각 시험 결과의 평균값을 사용한다. 얻은 변수 설정값은 시험&오차(Trial Error) 방법으로 조정하여 최종 값을 설정하였다. 최종 변수 설정값은 표 1과 같으며 각 변수 조정결과는 그림 6과 같다. 또한 조정과정에서 2차 과열기 출구온도 설정값과 실제값과의 편차(A2SH-OST-ERR)를 피드포워드로 사용하기 위해 제어로직을 보완했다.

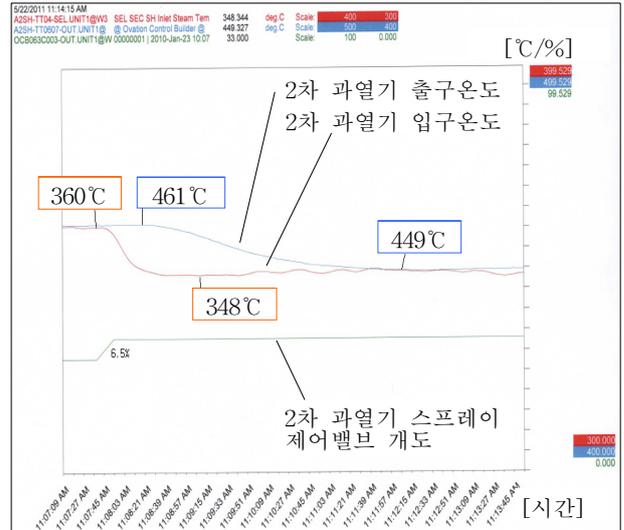


그림 5 1차 과열기 스프레이 제어밸브 계단응답시험  
 Fig. 5 Step response test of primary superheater spray control valve

표 1 1차 스프레이 제어밸브 제어기 변수 최종 설정값  
 Table 1 Final parameter of primary spray control valve controller

구 분	P Gain	I Time
2차 PI 제어기	0.4	100
1차 PI 제어기	1	400

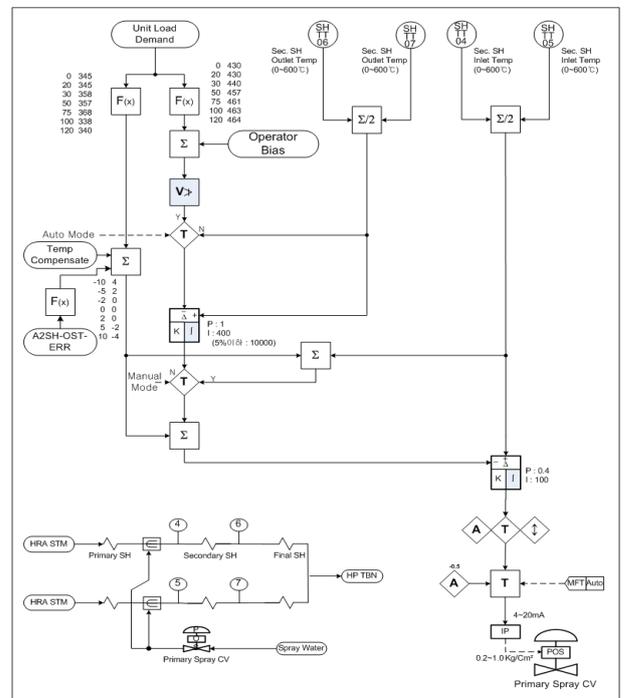


그림 6 과열기 1차 스프레이 제어밸브 최종 제어로직 및 변수 설정값  
 Fig. 6 Final control logic and parameter of superheater primary spray control valve

2.2.3 과열기 2차 스프레이 제어밸브 제어로직 시험 및 조정

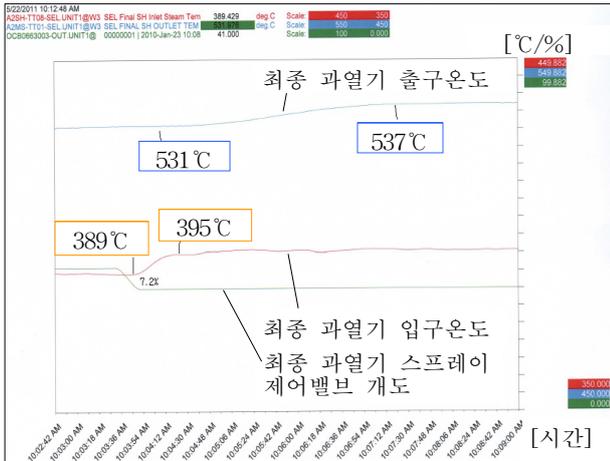


그림 7 과열기 2차 스프레이 제어밸브 계단응답시험  
Fig. 7 Step response test of final superheater spray control valve

표 2 2차 스프레이 제어밸브 제어기 변수 최종 설정값  
Table 2 Final parameter of secondary spray control valve controller

구 분	P Gain	I Time
2차 PI 제어기	1.0	120
1차 PI 제어기	0.8	400

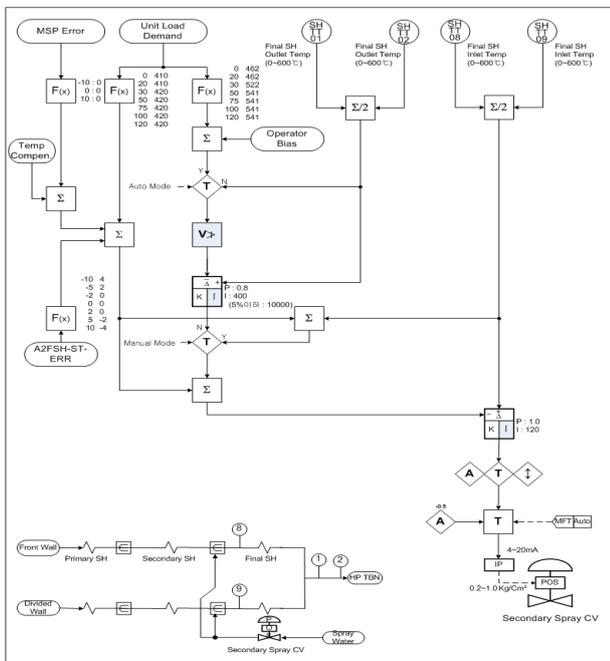


그림 8 과열기 2차 스프레이 제어밸브 최종 제어로직 및 변수 설정값  
Fig. 8 Final control logic and parameter of superheater secondary spray control valve

그림 7은 과열기 2차 스프레이 제어밸브를 7.2% 닫으면서 계단응답시험한 결과이다. 그림 7의 결과 및 식 1~4에 의해 얻은 P Gain과 I Time은 각각 1.2, 90, 1.0, 360이다.

얻은 변수 설정값은 시험&오차(Trial Error) 방법으로 조정하여 최종 값을 설정하였다. 최종 변수 설정값은 표 2와 같으며 각 변수 조정결과는 그림 8과 같다. 또한 조정과정에서 최종 과열기 출구온도 설정값과 실제값과의 편차(A2FSH-ST-ERR)를 피드포워드로 사용하기 위해 제어로직을 보완했다.

2.2.4 재열기 스프레이 제어밸브 제어로직 시험 및 조정

그림 9는 재열기 스프레이 제어밸브를 5% 닫으면서 계단응답시험한 결과이다. 그림 9의 결과 및 식 1~4에 의해 얻은 P Gain과 I Time은 각각 0.42, 850, 1.0, 1000이다. 그림 10은 재열기 가스댐퍼를 10% 열면서 계단응답시험한 결과이다. 그림 10의 결과 및 식 1, 2에 의해 얻은 P Gain과 I Time은 각각 1.67, 1050이다.

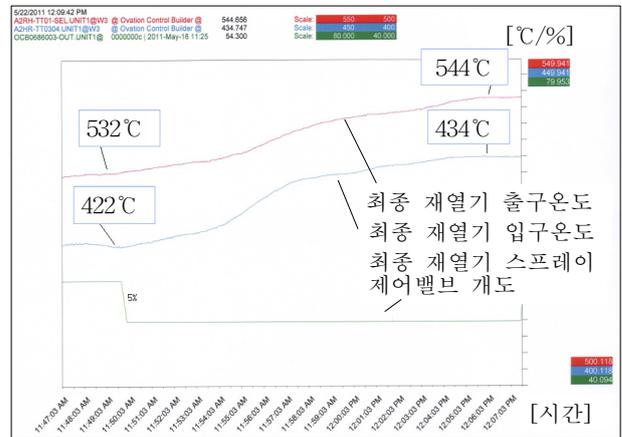


그림 9 재열기 스프레이 제어밸브 계단응답시험  
Fig. 9 Step response test of final reheater spray control valve

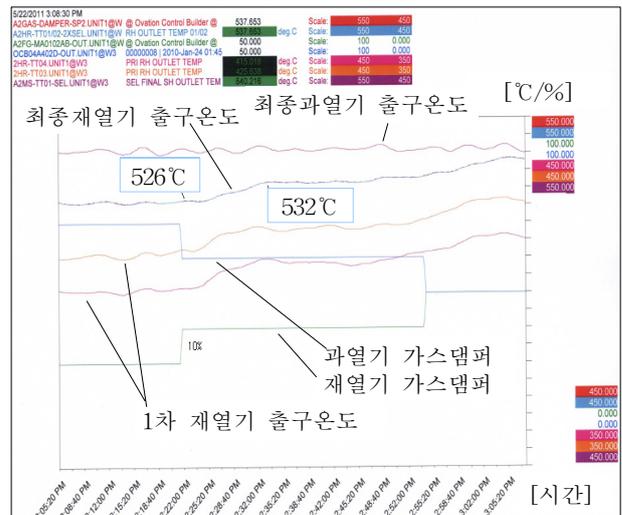
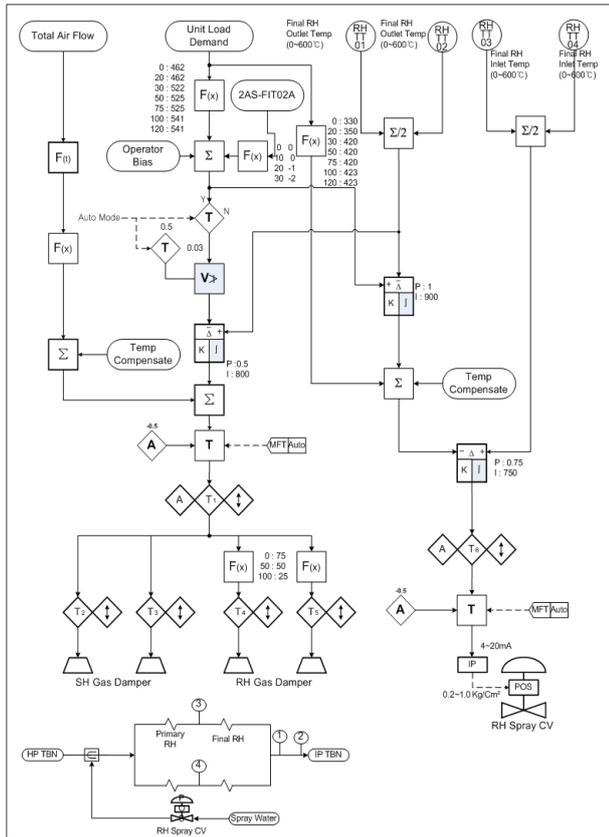


그림 10 재열기 가스댐퍼 계단응답시험  
Fig. 10 Step response test of reheater gas damper

얻은 변수 설정값은 시험&오차(Trial Error) 방법으로 조정하여 최종 값을 설정하였다. 재열기 스프레이와 가스댐퍼의 최종변수 설정값은 표 3과 같으며 각 변수 조정결과는 그림 11과 같다. 또한 조정과정에서 최종 과열기 출구온도 설정값과 실제값과의 편차(2AS-FIT02A)를 피드포워드로 사용하기 위해 제어로직을 보완했다.

**표 3** 재열기 스프레이 제어밸브 제어기 변수 최종 설정값  
**Table 3** Final parameter of reheater spray control valve controller

재열기 스프레이	P Gain	I Time
2차 PI 제어기	0.75	750
1차 PI 제어기	1	900
재열기 가스댐퍼	P Gain	I Time
PI 제어기	0.5	800

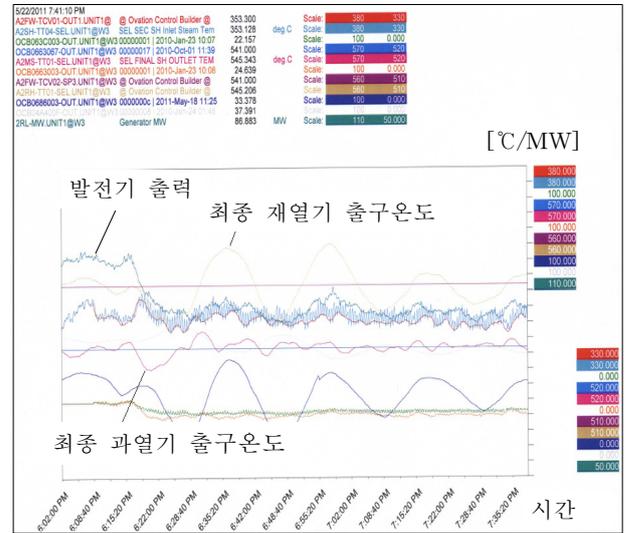


**그림 11** 재열기 스프레이 제어밸브 최종 제어로직 및 변수 설정값  
**Fig. 11** Final control logic and parameter of reheater spray control valve

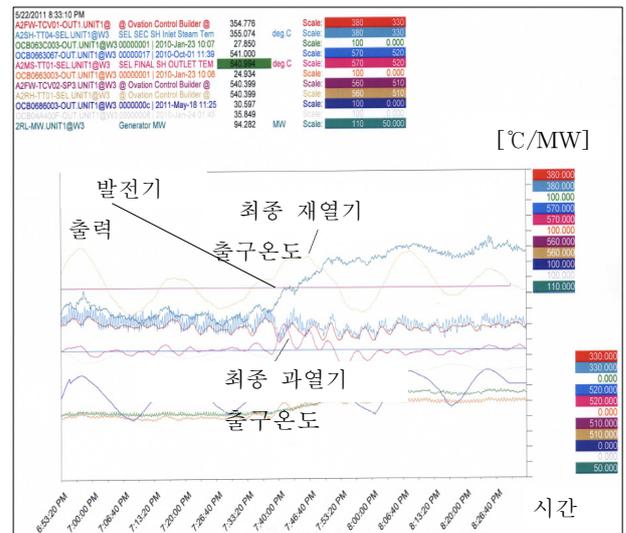
**2.2.5 최종시험결과**

발전기 출력을 변화시키면서 변수를 조정한 최종 결과는 그림 12, 13과 같으며 온도편차는 표 4와 같다. 적절한 온도

범위에서 온도를 제어할 수 있게 되어 발전소를 안정적으로 운전할 수 있게 되었다.



**그림 12** 92→82MW 부하변동시 온도변화  
**Fig. 12** Temperature change in load 92→82MW



**그림 13** 82→92MW 부하변동시 온도변화  
**Fig. 13** Temperature change in load 82→92MW

**표 4** 최종시험결과

**Table 4** The result of final test

발전기 출력변화 [MW]	주증기 온도편차[°C]	재열증기 온도편차[°C]	비고
92 → 82	544(+3)	547(+6)	1MW/min
82 → 92	538(-3)	535(-6)	
92 → 82	545(+4)	546(+5)	1MW/min
82 → 92	538(-3)	537(-4)	

### 3. 결 론

계획에방정비공사시 과열기 전열면적을 일부 조정함에 따라 과열기 및 재열기 스프레이 및 가스댐퍼에 대한 제어로직을 재설계하고 이를 적용하기 위한 시험으로 계단응답시험과 제어기 변수 조정을 수행하였으며 발전기 출력 및 연료 변동시 온도를 안정적으로 제어하게 되었다. 공급되는 연료의 제약으로 협조제어 운전모드로 운전하지 않고 터빈에서 초기압력제어(Initial Pressure Control) 모드로 운전을 하여 협조제어모드에 대한 튜닝을 수행하지 못하였으나 최종 조정 후 시험결과에서 보일러의 과열기 및 재열기 온도가 표 4의 결과를 보여주어 표 5의 석탄화력발전소 인수성능시험 운전범위를 잘 유지함으로써 설계한 로직으로 설비를 안정적으로 운영할 수 있음을 확인하였다.

**표 5** 석탄화력발전소 인수성능시험 운전범위

**Table 5** Acceptable operation range of performance test in coal-fired power plant

운전상태	주증기 온도변화 (°C)	재열증기 온도변화 (°C)	변화율
Step Change 50%MGR 이상	±10	±10	10초 내에 10% 변화

시험과 조정을 통해 제어변수를 최적화하고, 온도편차에 의한 피드포워드 기능을 보강함으로써 발전소를 좀 더 원활하고 신속하게 제어할 수 있게 되었다. 이러한 제어성능의 향상으로 발전소가 정상 상업운전 중에 있으며, 보일러 효율 향상 및 안정운전에 기여할 것으로 기대한다.

#### 감사의 글

본 연구는 2007년도부터 지식경제부 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행 중인 연구과제입니다.(NO R-2007-1-004-01)

#### 참 고 문 헌

- [1] Karl J. Åström, Tore Hägglund, "PID Controllers, 2nd Edition", Instrument Society of America, pp274-281, 1995
- [2] Gregory K. Mcmillan, "Good Tuning : A Pocket Guide", The Instrumentation, Systems and Automation Society, pp96, 2005
- [3] Paul W. Murrill, Ph.D., "Fundamentals of Process Control Theory", Instrument Society of America, pp137-146, 2000
- [4] Cecil L. Smith, "Practical Process Control, Tuning and Troubleshooting", John Willey & Sons, Inc., pp272, 2009
- [5] SAM G. Dukelow, "The Control of Boilers, 2nd Edition", The Instrumentation, Systems and

Automation Society, pp145-147, 1991

- [6] 신취범, 이순영, "화력발전소의 과열증기의 온도제어", 대한전기학회 59권 11호, pp2006, 2010

### 저 자 소 개



#### 임 건 표 (林 建 杓)

1972년 11월 3일생. 2010년 충남대 전기공학과 대학원 졸업. 현재 한전전력연구원 선임연구원.

Tel : 042-865-5603

E-mail : kepcolim@kepco.co.kr



#### 이 흥 호 (李 興 浩)

1950년 10월 28일생, 1994년 서울대 컴퓨터공학과 대학원 졸업(박사), 현재 충남대학교 전기공학과 교수

Tel : 042-821-5656

E-mail : leehh@cnu.ac.kr