

# 석탄화력발전소 보일러 연료제어 알고리즘과 분산제어시스템의 개발

## The Development of Boiler Fuel Control Algorithm and Distributed Control System for Coal-Fired Power Plant

임 건 표\* · 이 흥 호†  
(Gun-Pyo Lim · Heung-Ho Lee)

**Abstract** - This paper is written for the development and application of boiler fuel control algorithm and distributed control system of coal-fired power plant by the steps of design, coding, simulation test, site installation and site commissioning test. Fuel control algorithm has the upper algorithm and it is boiler master control algorithm that controls the fuel, feed water, air by generation output demand. Generation output demand by power load influences fuel control. Because fuel can not be supplied fast to the furnace of boiler, fuel control algorithm was designed adequately to control the steam temperature and to prevent the explosion of boiler. This control algorithms were coded to the control programs of distributed control systems which were developed domestically for the first time. Simulator for coal-fired power plant was used in the test step. After all of distributed control systems were connected to the simulator, the tests of the actual power plant were performed successfully. The reliability was obtained enough to be installed at the actual power plant and all of distributed control systems had been installed at power plant and all signals were connected mutually. Tests for reliability and safety of plant operation were completed successfully and power plant is being operated commercially. It is expected that the project result will contribute to the safe operation of domestic new and retrofit power plants, the self-reliance of coal-fired power plant control technique and overseas business for power plant.

**Key Words** : Control, Algorithm, Fuel, DCS, Distributed control system, Coal-fired, Power plant

### 1. 서 론

1994년경 국내 최초로 설치된 500[MW]급 석탄화력발전소를 비롯한 대용량 석탄화력발전소는 현재 국내 총 발전용량의 약 30[%]를 담당하고 있다. 기계설비는 설계수명이 30년 이상으로 여전히 사용연한 내에서 운전이 가능하나, 제어설비는 내용수명이 12년으로 사용연한을 초과하여 주기적인 정비와 교체를 시행하여 왔다. 제어설비 교체주기는 일반적으로 일본의 경우 13년, 국내의 경우 17년 정도이다. 최근 삼천포 화력발전소에서 외국제품으로 교체를 하였으며, 보령 화력에서도 1개호기 교체를 완료하였다. 여전히 발전소 제어설비는 국외기술로 제작된 분산제어시스템을 사용하고 있다. 이에 유지정비가 외국기술에 상당히 의존적이며, 교체주기가 도래한 현 시점에서 여전히 외국제품을 사용할 수밖에 없는 현실이다.

자동제어시스템은 전력계통의 전력요구에 따라 발전소를 신속하게 제어하고, 각종 설비들의 운전 상태를 감시하여 발전소를 안정적으로 운전하기 위한 핵심적인 역할을 수행한다. 최근 발전소의 대용량화 및 고효율화에 따라 자동제어시스템은 점차 고도화되어 가고 있다. 발전소 자동제어시스템의 중요성이 점차 부각되고 있으나, 국내에서는 여전히 제

어시스템 자체 및 기술을 대부분 외국 선진기술에 의존하고 있다. 이에 발전소 핵심기술의 자립 및 기간산업의 안정적인 운영 측면에서 국가주도로 대용량 석탄화력발전소 분산제어시스템의 하드웨어와 소프트웨어를 연구함으로써 국산화 개발에 성공하였다. 최근까지 국내에서도 제어알고리즘을 개발하여 적용한 예는 빈번이 있었으나 대형 석탄화력발전소에 적용하기 위하여 분산제어시스템의 하드웨어와 소프트웨어를 동시에 개발한 경우는 이번이 처음이다[1].

본 논문에서 다루는 대용량 석탄화력발전소 분산제어시스템의 일부인 보일러 연료 제어는 증기를 발생시키기 위한 연료량을 제어하기 위한 부분으로 제어대상인 연료량에 따라 변화하는 증기량과 증기 엔탈피는 전력계통에 연계된 발전기 출력을 변화시킨다. 이러한 대용량 석탄화력 발전소 보일러 연료 제어용 표준알고리즘을 개발하여, 국산화된 분산제어시스템의 프로그램에 맞게 코딩하여 탑재하고, 모의시험을 성공적으로 수행한 후, 현장에 설치하여 다양한 시운전을 거쳐 성공적으로 상업운전에 들어간 연구내용을 기록함으로써 전체적인 발전소 제어시스템의 개발과정을 서술하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 연료 제어계통 개요

화력발전소는 그림 1과 같이 보일러와 터빈으로 구성되어 있으며 이를 제어하기 위한 최상위 제어기로 보일러 주제어기와 터빈 주제어기를 가지고 있다. 보일러 주제어기와 터

\* 정 회 원 : 한전전력연구원 선임연구원

† 교신저자 : 충남대 전기공학과 교수

E-mail : leehh@cnu.ac.kr

접수일자 : 2013년 1월 14일

최종완료 : 2013년 2월 23일

빈 주제어기를 총칭하여 유닛 주제어기라고 한다. 보일러 주제어기는 보일러에서 필요한 공기, 연료, 급수를 제어하는 각 주제어기에 상위제어 신호를 내보낸다[1].

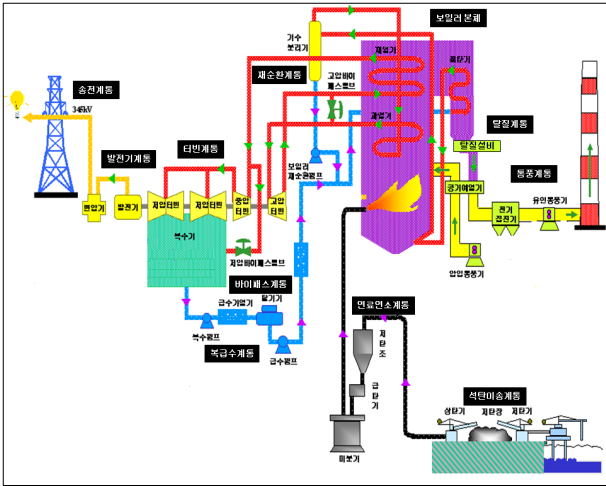


그림 1 발전소 전체 구성  
Fig. 1 Entire configuration of power plant

그림 1의 연료 연소계통을 제어하기 위한 연료 주제어기는 그림 2에서 좌측의 6대로 구성된 급탄기(Coal Feeder)와 미분기(Mill) A~F를 제어한다. 급탄기는 연료 주제어기 신호에 의해 급탄 속도가 제어되고, 총 240[ton/hr] 용량의 6대 미분기로 운송된 석탄은 그림 2 우측의 1차 통풍기(PAF)에 의해 공급된 석탄 건조 및 운반 공기에 의해 건조된 후 보일러에서 연소가 가능하도록 미분탄 형태로 분쇄되어 보일러로 운송된다.

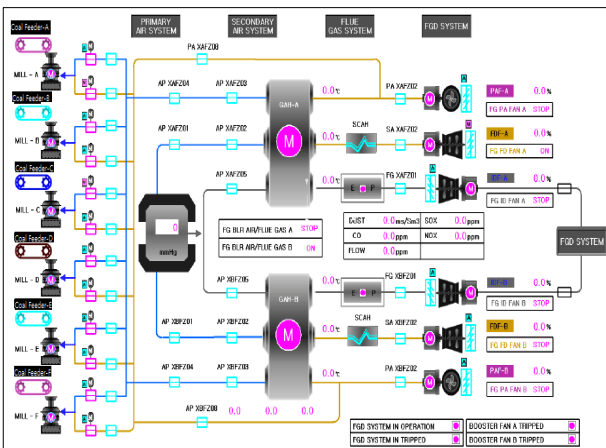


그림 2 연료공급계통  
Fig. 2 Fuel supply system

그림 3은 그림 2의 급탄기와 미분기의 상세한 구성을 나타내고 있다. 미분기에서 분쇄된 미분탄은 그림 3의 우측 상단의 1~4와 같이 4개의 석탄 이송관을 통해 보일러 버너로 이송되어 연소된다.

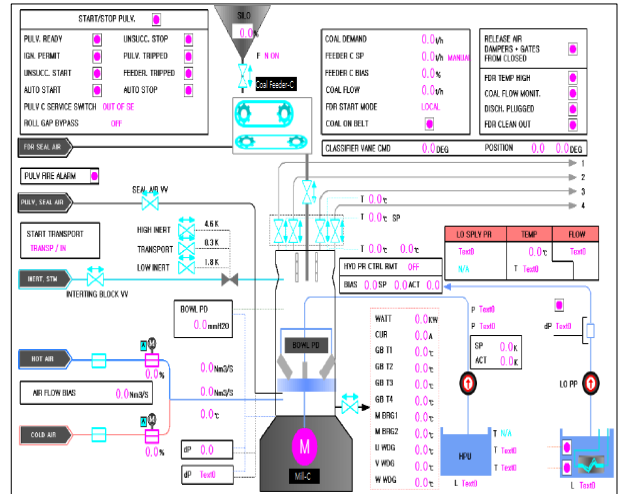


그림 3 급탄기 및 미분기 계통  
Fig. 3 Coal Feeder and Mill System

2.2 제어 알고리즘의 설계

그림 4는 유닛 주제어기의 간략한 개요를 나타내고 있다. 전력계통에서 요구하는 전력요구신호(ADS, Auto Dispatch Signal)에 따라 발전소를 제어하기 위한 최상위 신호로 보일러 주제어기(Boiler Master)와 터빈 주제어기(Turbine Master)가 있으며, 보일러 주제어기 하부에 연료, 공기, 급수 주제어기(Fuel, Air, FW Master)가 있다. 주증기 압력 설정값은 보일러와 터빈의 상호 협조 제어를 위한 보일러 및 터빈 협조제어(CC Mode Control)값을 보정 합산한 후 보일러 압력 제어(Boiler Pressure Control) 로직을 거쳐 터빈속도 오차(Speed Error)를 합산하여 최종 결정된다 [2][3].

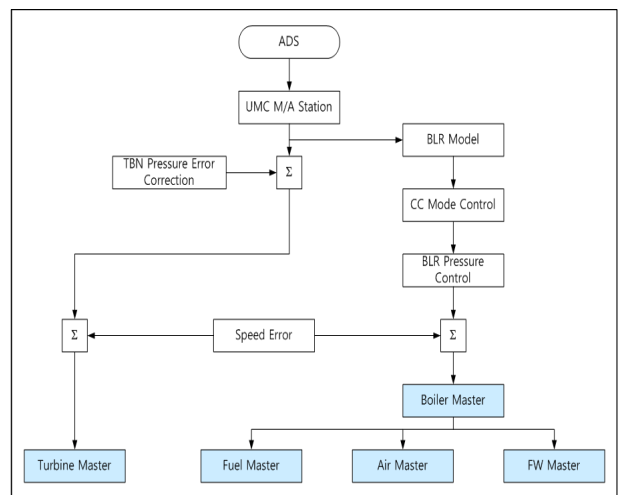


그림 4 유닛 주제어기의 개요  
Fig. 4 Outline of unit master controller

그림 5는 연료 제어로직의 전체적인 제어전략을 나타내고 있다. 연료 주제어기는 보일러 주제어기로부터의 PI제어기 설정값과 연료 측정값에 의한 PI제어기 공정변수에 의해 생

성한다. 이 신호는 석탄을 공급하는 급탄기 6대를 제어하기 위한 속도요구신호를 생성한다.

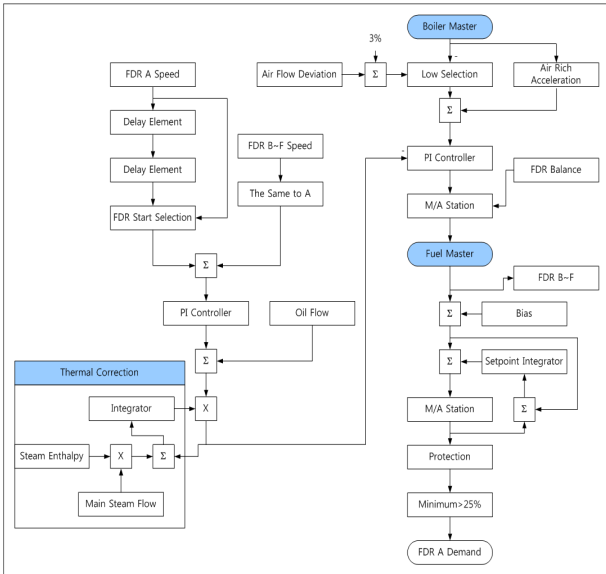


그림 5 연료 제어로직의 전체 제어전략  
Fig. 5 Entire control strategy of fuel control logic

2.2.1 PI 제어기의 설정값

공기/연료 교차 제한 기능으로 공기유량이 공기유량 요구 신호보다 3[%] 적은 경우 하한값을 제한한다. 공기유량 요구 신호 값에 공기유량 귀환신호를 감한 값을 공기유량 편차 값으로 입력받아 3[%]를 더한 값을 보일러 주제어기 값과 비교하여 더 적은 값을 선택한다. 이는 항상 연료보다 공기를 3[%] 더 공급하는 기능을 하여 불완전 연소를 방지한다 [4]. 보일러 주제어기를 입력으로 하한값을 제한한 출력과 과잉공기 가속기 출력을 합산한 결과는 PI제어기 설정값으로 입력한다.

2.2.2 과잉공기 가속기(Air Rich Acceleration)

식 (1)과 같은 형태의 미분기를 추가하여 연료량 요구 신호가 변화할 때 과잉공기를 신속히 공급하는 기능을 한다.

$$Y(S) = KD \frac{T_1 S}{1 + T_1 S} \tag{1}$$

단, Y는 미분기 출력  
KD는 미분기 이득  
T1은 미분 시간

2.2.3 PI 제어기 공정변수

급탄기 속도 신호는 시간당 석탄의 공급량으로 [ton/hr]를 사용한다. 석탄을 공급하는 지연요소는 두 개로 구분된다. 첫 번째는 석탄을 분쇄하는 미분기, 두 번째는 미분기에서 보일러 버너까지의 이송관이다. 미분기는 석탄이 보일러에

서 낙하하지 않고 연소될 수 있도록 건조, 분쇄하여 미분탄을 만들어 공급하는 기능을 한다. 미분기에서의 미분탄은 미분탄 이송관을 거쳐 보일러 버너로 운송된다. 이러한 지연요소를 감안하여 급탄기 기동 후 15초간은 식 (2)와 같은 지연요소를 거치도록 한다.

$$Y = D_1 \times D_2 = \left( KP_1 \frac{1}{1 + T_1 S} \right) \left( KP_2 \frac{1}{1 + T_2 S} \right) \tag{2}$$

단, D는 지연요소  
KP는 비례이득  
T는 지연시간

유니트 주제어기 제어로직의 미분동작은 과잉연소, 부족연소로 연료 및 급수량 요구신호에 동시에 작용하여 제어계의 속응성을 높이는 반면, 미분기 모델링은 연료량의 귀환신호에 지연요소 모델을 적용하여 속응성을 향상시킨다. 급탄기 기동 15초 후까지는 지연요소를 거친 값을 선택하고 15초가 지나면 급탄기 속도 신호를 바로 선택하여 사용한다. 또한 급탄기 속도신호에 문제가 발생할 경우에는 급탄기 속도요구신호를 사용한다. 급탄기 A~F까지의 속도신호에 의한 석탄공급량을 합산한 결과는 PI제어기를 거쳐 보조연료인 경유 유량과 합산하여 열량 보정을 하여 연료주제어기 PI제어기의 공정변수로 입력한다.

석탄의 발열량에 따른 열량 보정(Thermal correction)은 석탄유량과 열방출량(Thermal release)의 편차에 따라 80~120[%] 범위에서 보정한다. 열방출량은 주증기유량과 증기 엔탈피에 의해 구한다. 증기 엔탈피가 2,000[kJ/kg](=476[kcal/kg]) 일 때 100[%]의 출력신호를 갖는다. 최종적인 증기 엔탈피는 주증기 압력과 온도에 따라 증기표에 의해 구해지며 그림 6과 같은 값을 가진다. 그림 6은 발전소 부하별 증기 엔탈피를 나타낸다.

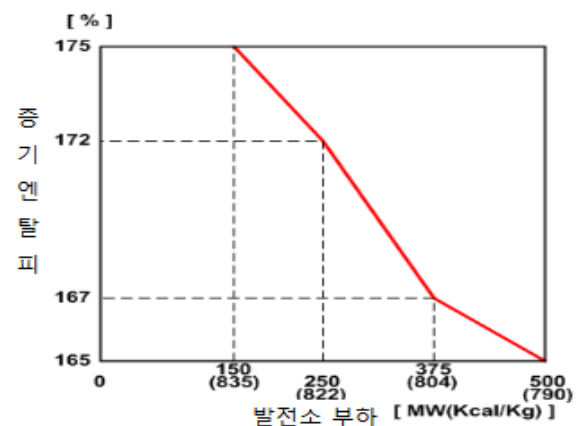


그림 6 발전소 부하별 증기 엔탈피  
Fig. 6 Load vs steam enthalpy

열방출량은 주증기 유량과 증기 엔탈피의 곱으로 얻을 수 있다. 주증기 유량은 발전소 부하에 대하여 그림 7과 같이 나타낸다.

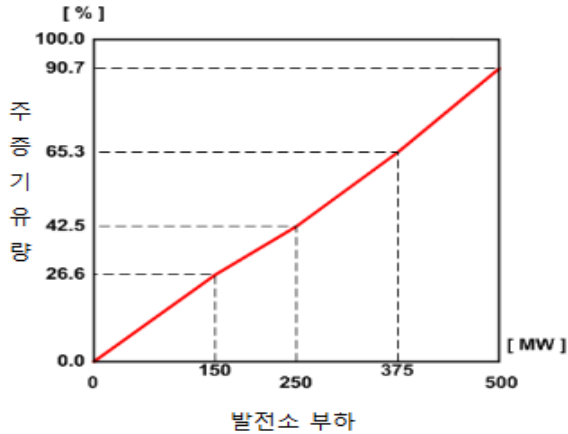


그림 7 발전소 부하별 주증기 유량  
Fig. 7 Load vs steam flow

그림 6의 증기 엔탈피는 그림 8과 같이 0~100[%]로 범위를 조정하여 주증기 유량과 곱하여 그림 9와 같이 열방출량을 구한다.

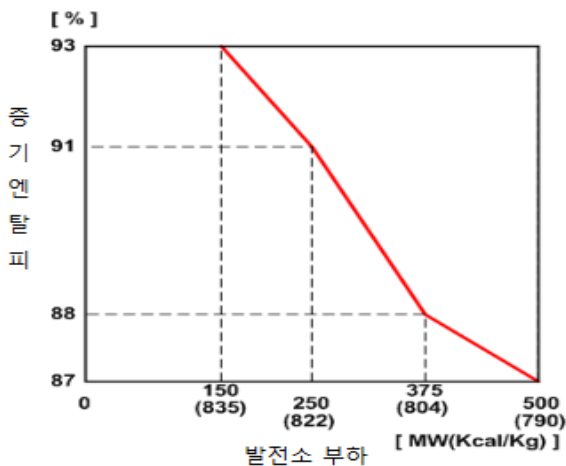


그림 8 0~100% 범위로 조정한 발전소 부하별 증기 엔탈피  
Fig. 8 Load vs steam enthalpy which its range is 0~100%

열량 보정은 열방출량과 총 연료량의 편차로 구한다. 보일러에 공급하는 총 연료량이 열방출량 설계값과 동일할 경우 100[%]의 열량보정을 한다. 연료의 발열량이 낮거나 높은 경우 편차가 발생하여 총 연료량은 열량 보정에 의해 80~120[%]로 증감시킨다.

열량보정의 적분기는 식 (3)과 같은 형태의 기능을 갖는다. T1은 적분 시간이다.

$$Y(s) = \frac{1}{T_1 s} \quad (3)$$

적분기는 자동 및 수동 모드시 다른 값을 출력한다. 자동 모드인 경우 열방출량과 총 연료량의 편차에 의해 열량보정을 식 (3)과 같은 적분기 출력으로 내어 보내되 80~120[%]로 제한한다. 보일러 화염을 감지할 수 없는 경우는 100[%]

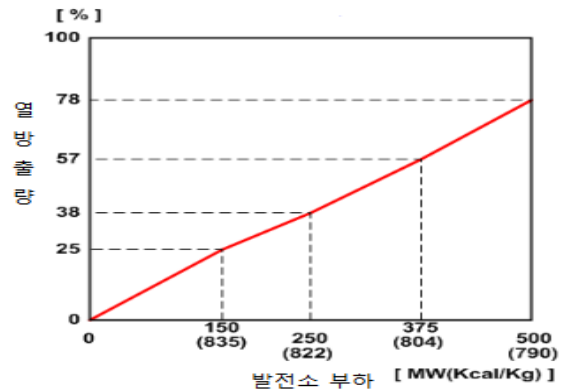


그림 9 발전소 부하별 열방출량  
Fig. 9 Load vs thermal release

보정을 하는데 이때는 이미 보일러가 기능을 제대로 하지 않는 것으로 판단하여 보일러를 정지시켜야 한다. 또한 주증기 유량이 30[%] 이상인 경우에만 보정을 한다.

보일러에 공기와 연료, 급수가 공급되어 주증기가 생성되기까지 소요되는 시간이 길기 때문에 이와 관련하여 열량보정 시정수는 2배 이상 길게 설정하여야 보일러를 안정되게 운전할 수 있다. 따라서 식 (3)의 T1은 발전소 보일러의 시정수를 확인하여 충분히 운전제어가 가능하도록 설정하여야 한다.

### 2.2.4 PI 제어기의 모드

PI 제어기 하부의 자동수동 절환기(M/A Station)가 자동 모드인 경우 보일러 주제어기에 의한 설정값과 열량을 보정한 연료 유량의 편차를 식 (4)의 함수를 거쳐 출력한다.

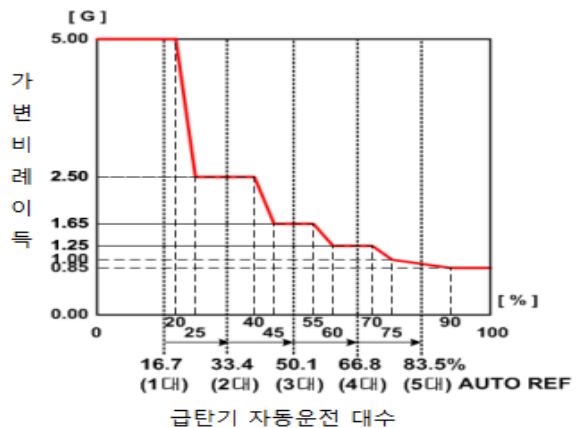


그림 10 급탕기 자동운전 대수에 따른 가변 비례이득  
Fig. 10 Variable proportional gain by number of automatic coal feeders

KP는 비례이득, TN은 적분시간이다. 급탕기가 6대이기 때문에 자동운전 급탕기 대수에 따라 비례이득을 그림 9와 같이 가변적으로 운용한다.

$$Y(s) = KP \frac{1 + T_N s}{T_N s} \quad (4)$$

자동수동 전환기가 수동으로 절체되면 연료 주제어기는 수동상태가 되며 이때 PI 제어기도 수동모드로 절체된다. 수동으로 절체되면 자동/수동 절환기의 출력을 추종한다.

발전소를 기동하는 단계에서 석탄 유량이 6.5[%] 이상인 경우 정방향의 적분동작을 중지한다. 급탕기가 모두 수동모드이거나 최소유량으로 급탕하고 있는 경우 부방향의 적분동작을 중지한다.

급탕기의 최소 급탕량을 감안하여 하한값을 24[%]로 제한한다. 상한값은 100[%]로 제한한다.

### 2.2.5 자동/수동 절환기

자동수동 절환기를 지난 신호는 최종적인 연료주제어기 신호를 생성한다. 급탕기가 한 대 이상 자동모드인 경우 PI 제어기 출력을 내보내되 PI 제어기 출력에 도달하는데 걸리는 동작시간을 설정하여 난조가 발생하지 않도록 한다. 급탕기가 모두 수동모드로 절체되면 급탕기 밸런스 신호를 출력한다. 모든 급탕기가 수동모드인 경우 급탕기 속도신호를 합산한 총 속도를 급탕기 대수로 나눈 값인 급탕기 평균속도를 추종한다. 이 신호는 각 급탕기의 자동 바이어스 기능에 의해 각 급탕기별로 밸런스를 이루게 된다. 모든 급탕기가 수동모드였다가 어느 하나가 자동모드로 절체될 경우 연료 주제어기는 자동모드로 절체되어 운전하게 된다. 수동모드에서 자동모드로 절체될 경우 난조를 없애기 위하여 수초간의 일정 시간차이를 두고 적절한 기울기로 변환 후 최종적으로 자동모드로 절체된다. 이때 수동모드에서 자동모드로 절체되는 동안에도 급탕기 밸런스 신호를 추종한다. 급탕기 밸런스 신호의 우선순위는 급탕기 A부터 F까지 순서대로이며 해당 급탕기가 자동모드인 경우 급탕기 기동 선택 출력 신호인 보정된 급탕기 속도신호에 각 급탕기의 자동 바이어스 신호를 감한 결과를 사용한다.

### 2.2.6 급탕기 속도요구신호 생성

연료 주제어기에 더하는 바이어스는 자동운전 상태에서 운전원이 바이어스를 ±25[%] 범위로 줄 수 있도록 하였다. 급탕기가 수동으로 절체될 경우 바이어스는 0[%]로 설정된다. 자동 바이어스인 경우 급탕기 수동모드 운전시 연료 주제어기의 자동모드 출력과 급탕기 속도요구신호와의 편차분을 없애는 역할을 한다. 즉 연료 주제어기의 자동모드 출력에 급탕기 속도요구신호를 생성하는 자동/수동 스테이션의 출력을 감한 결과를 동작시간을 조절하여 난조가 발생하지 않도록 하여 내보낸다. 급탕기가 자동모드인 경우는 0[%] 출력을 내보낸다.

급탕기 속도요구신호는 자동수동 절환기를 거치는데 수동모드인 경우 미분기 냉공기 또는 열공기 램퍼가 수동모드이거나 공기유량 제어가 수동모드이거나 미분기 스위치 기어에 문제가 발생하여 응답이 없는 경우이거나 주증기 열량이 총공기 유량보다 50[%] 이상이거나 운전원이 수동으로 절체할 경우 수동모드로 절체된다. 자동모드인 경우 미분기가

자동모드인 상태에서 급탕기 속도제어 자동모드 허용 신호가 들어올 경우로 연료 주제어기 신호를 추종한다. 최소속도 운전신호가 들어오거나 주증기 열량이 총공기 유량보다 50[%] 이상이거나 급탕기 원격제어 상태가 아니거나 급탕기 수동모드 경보가 발생할 경우 밸런스 모드가 된다. 최소 속도 운전 신호가 들어오거나 주증기 열량이 총공기 유량보다 50[%] 이상일 경우 급탕기 속도는 24%로 설정되고 나머지 경우는 현재 급탕기 속도를 유지한다. 최소속도 운전신호는 급탕기가 정지되거나 미분기 차압이 높거나 미분기 전동기가 과부하 상태로 경보가 발생하거나 운전원이 최소신호를 줄 경우 발생한다.

### 2.3 제어로직 코딩

설계한 연료제어 알고리즘의 일부는 그림 11과 같으며, 표준심볼로 제작하여 어느 시스템에도 코딩하여 적용할 수 있도록 하였다. 알고리즘은 자동제어로직, 순차제어로직으로 구성되어 있으며, 표준심볼 로직은 개발 중인 분산제어시스템에서 사용하는 스트라톤(Straton IEC61131-3 개발환경) 프로그램으로 그림 12와 같이 코딩하였다[1][5].

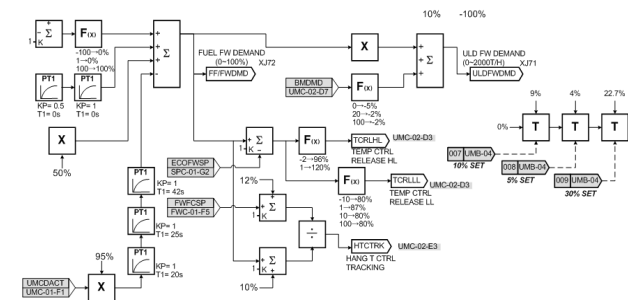


그림 11 표준심볼로 설계한 연료제어 알고리즘의 일부  
Fig. 11 Part of fuel control algorithm designed by standard symbols

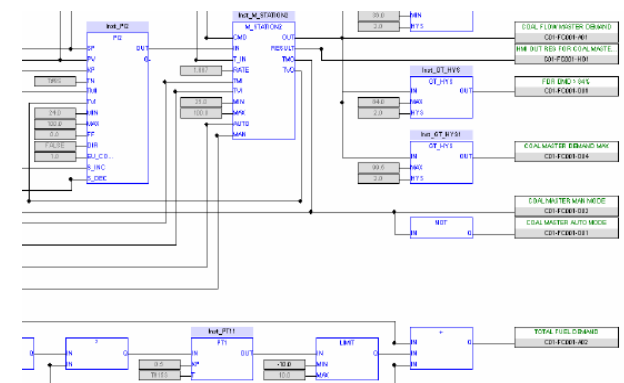


그림 12 코딩작업을 수행한 연료제어 알고리즘의 일부  
Fig. 12 Part of coded fuel control algorithm

### 2.4 시뮬레이터의 구성

코딩한 제어로직을 시험하기 위하여 그림 13과 같은 시뮬레이터를 개발하여 이용하였다.

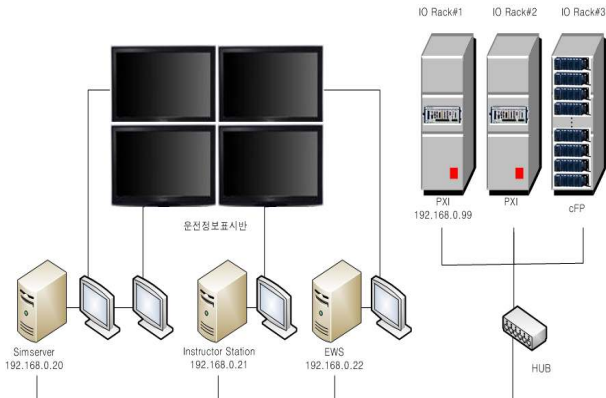


그림 13 시뮬레이터 구성도  
Fig. 13 Simulator configuration

시뮬레이터는 발전소 시뮬레이터 모델이 구동되는 시뮬레이션 서버, 다양한 사고상황을 투입하는 강사조작 컴퓨터, 시스템을 정비하고 각종 정보를 관리하기 위한 EWS, 실제 제어실과 같이 운전상황을 감시하고 조작하기 위한 운전정보표시반으로 구성되어 있다. 시뮬레이터의 공정모델은 실행과일이 C++ 알고리즘인 쓰리키마스터(3Keymaster)를 사용하였다. 시뮬레이터에는 실제 발전소에 설치하게 될 제어 알고리즘을 설치한 분산제어시스템을 통신을 통해 연결하여 시험할 수 있도록 그림 13의 입출력 신호 랙(IO Rack #1~3)을 구성하였다. 입출력 신호 랙은 랩뷰 프로그램으로 개발된 인터페이스 시스템이다. 분산제어시스템을 시뮬레이터에 연결하면, 시뮬레이터는 실제 발전소와 같이 설비의 공정특성과 제어신호를 발생하여, 개발한 알고리즘을 실제와 같이 시험할 수 있도록 하였다[1].

2.5 시뮬레이터와 분산제어시스템의 연계

제어모델과 공정모델로 구성된 그림 13의 시뮬레이터에 그림 14와 같이 보일러 분산제어시스템 패널 1 세트, 터빈 분산제어시스템 패널 1 세트로 구성된 실제 패널을 신호선

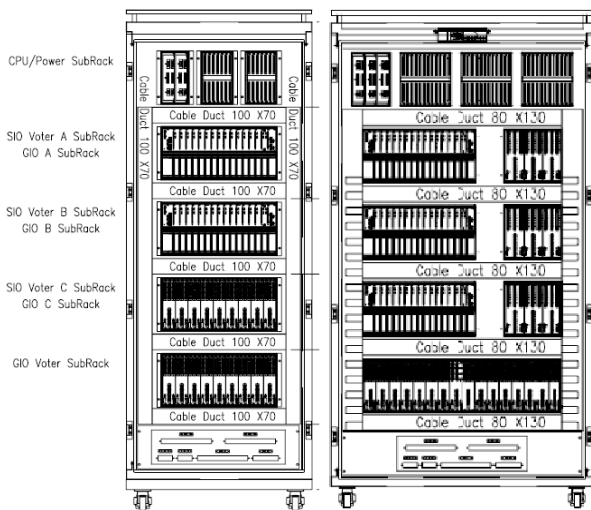


그림 14 시뮬레이터 분산제어시스템 패널  
Fig. 14 Distributed control system panel for simulator

으로 입출력 신호 랙에 연결하였다.

분산제어 패널은 위에서부터 프로세스 카드, 전원 장치, 통신카드, 입출력 카드 등으로 구성되어 있다. 프로세스 카드에 설치한 제어로직 알고리즘 부분에 해당되는 제어모델을 시뮬레이터에서 분리하였다. 코딩한 로직은 그림 13의 엔지니어링 워크스테이션을 통해 그림 14의 프로세스 카드에 설치한 후 시뮬레이터의 공정모델에 연결하여 실제 발전소 형태로 시험을 하였다. 각 단위 설비에 대한 모의시험이 끝난 후 발전소에 설치할 분산제어시스템 전체를 시뮬레이터에 연계하여 각 단위설비간의 신호연계를 통한 종합모의 시험을 시행하였다[1].

2.6 현장설치

시뮬레이터에서의 모든 분산제어시스템의 단위기기시험과 종합시험을 성공적으로 완료한 후 모든 분산제어시스템을 발전소 현장에 설치하였다. 현장에 설치한 분산제어시스템의 전체구성은 그림 15와 같다. 그림 15의 자동제어패널(APC) 행의 각 시스템은 여러 대의 패널로 구성되어 있다.

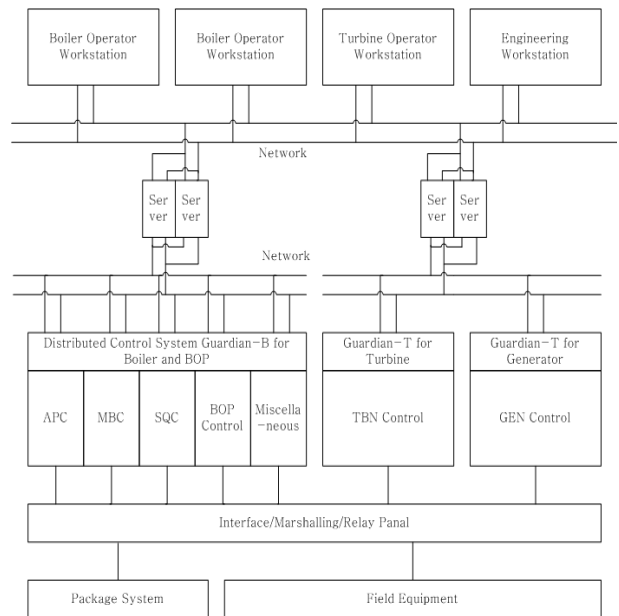


그림 15 분산제어시스템 구성도  
Fig. 15 Configuration of the distributed control system

발전소 모든 현장설비와 패키지 설비의 입출력 신호는 마샬링 패널에 신호선으로 연결된다. 패키지 설비는 제매기, 전기집진기, 회처리 설비, 진동감시설비, 공기압축기 등으로 구성된다. 마샬링 패널에서 각 분산제어시스템 패널로 가기 위해 각 분산제어시스템 패널에 필요한 신호를 마샬링 패널로부터 인터페이스 패널로 모아 연결한다. 분산제어시스템에서 발생한 전동기 등의 기동정지신호는 릴레이 패널을 거쳐 전동기에 전원을 공급하게 된다. 분산제어시스템은 발전소 자동제어를 위한 최상위 제어기, 최상위 제어기로부터 자동 기동 및 정지신호를 받아 각 기기 레벨의 자동운전을 위한 변수 및 순차제어를 수행하는 중간 제어기, 중간제어기로부터 자동기동, 정지, 자동제어 신호를 받아 현장설비 각각

을 구동하는 최하위 제어기로 구성된다. 최상위 제어기는 보일러, 터빈, 발전기 등의 현장설비로부터 공정데이터를 수집하여 발전소 자동 기동, 정지, 자동제어에 필요한 운전신호를 중간제어기로 보내는 역할을 한다. 각 기기간의 보호 인터록은 최하위 제어기에서 수행한다. 보일러 분산제어시스템 패널은 자동제어(APC), 미분기 버너제어(MBC), 순차제어(SQC), 보조설비제어(BOP), 기타설비제어(Miscellaneous)로 구분한다. 자동제어 패널은 유니트 주제어기, 공기 주제어기, 연료 주제어기, 급수 주제어기, 통풍설비 제어기, 증기온도 제어기, 기수분리기 레벨 제어기, 고압 및 저압 증기 바이패스 제어기 등으로 각 제어기가 분리되어 있다. 미분기 버너제어 패널은 석탄 제어기, 보일러 퍼지 제어기, 주연료 트립 제어기, 보일러 트립 제어기, 보조연료 제어기, 미분기 운전모드 제어기 등으로 각 제어기가 분리되어 있다. 순차제어 패널은 보일러 증기 및 급수 기동/정지 제어, 보일러 유인통풍기/압입통풍기 기동/정지 제어, 인터록 및 드라이브 제어, 점화 기동, 드레인 및 벤트 밸브 제어 등으로 각 제어기가 분리되어 있다. 보조설비제어는 보조증기 압력 및 온도 제어, 복수기 제어, 고압 및 저압 히터 제어, 보조연료 압력 제어, 냉각수 제어, 복수 펌프 제어, 재순환 펌프 제어 등으로 구성되어 있다. 기타설비제어는 고압/저압 히터 드레인/벤트 기동 및 정지 제어, 복수펌프/냉각수 펌프 기동 및 정지, 보조증기 및 추기 계통 기동정지 제어 등으로 각 제어기가 분리되어 있다. 터빈 분산제어시스템 패널은 같은 제어기 세 개를 두어 삼중화로 구성되어 있다. 터빈제어기는 터빈 기동 제어, 터빈 운전모드 선택 제어, 터빈 예열, 터빈 부하제어, 터빈 속도 제어, 터빈 과속도 보호, 터빈 보조 제어, 증기터빈구동 급수펌프 A 제어기, 증기터빈구동 급수펌프 B 제어기, 전동기구동 급수펌프 제어기 등으로 각 제어기가 분리되어 있다. 발전기 분산제어시스템 패널은 자동 전압 제어, 전력 시스템 안정화 장치, 전압/주파수 제어, 부족여자제한, 과여자 제한, 밀봉오일 시스템, 고정자 냉각 시스템 제어기 등으로 각 제어기가 분리되어 있다. 각각의 분산제어시스템 패널은 입출력 신호를 이중화된 네트워크 통신으로 연계하여 연동하며 정비용 및 운전원 워크스테이션을 통해 시스템을 정비하고 발전소를 운전한다. 각각의 분산제어시스템 패널은 그림 15와 같이 자신의 중앙처리장치(CPU)를 가지며 어느 하나의 분산제어시스템에 문제가 발생할 경우 경보신호를 발생하여 다른 분산제어시스템에 전달함으로써 경보신호를 전달받은 분산제어시스템은 수동으로 절체되거나 출력을 늘리거나 줄이도록 하여 설비가 안정된 상태로 운전할 수 있도록 분산제어를 한다[6]. 그림 15의 분산제어시스템은 시뮬레이션에 연계하여 전체모의시험을 성공적으로 수행한 후 현장에 설치하였으며 시뮬레이션으로 수행한 시험 항목뿐만 아니라 실제 발전소에서 수행하는 단위기기 시운전, 인터록 시험, 평형 통풍 시험, 런백시험 등을 거쳐 신뢰성을 확인하였다.

## 2.7 현장 시험

시뮬레이터를 통한 모의시험을 성공적으로 수행한 후 그림 15와 같이 제어 패널과 워크스테이션 등 모든 분산제어시스템을 실제 발전소에 설치하여 현장시험을 수행하였다.

### 2.7.1 최초점화

그림 16과 같이 점화를 하지 않은 상태에서 각 통풍기, 급단기, 미분기, 버너 등의 단위기기 운전상태가 확인되어 최초로 점화를 수행하였다. 최초점화는 석탄 대신 보조연료인 경유를 사용하여 수행한다. 보일러에 연소용 공기와 급수를 공급하면서 3단으로 구성된 보조연료 버너 중 최하부 버너를 점화하여 보일러의 안전한 점화상태를 확인한다. 그림 16에서 연소용 공기는 최소 유량을 유지하고 있으며, 경유에 의한 최초점화시 연료, 공기, 급수를 총괄 제어하는 보일러 주제어기 신호에 따라 경유공급량이 최대 3.5[ton/hr]까지 정상적으로 제어되어 점화된 것을 확인하였으며, 보일러 튜브의 파열이나 폭발이 없이 안전하게 최초 점화에 성공하였다.

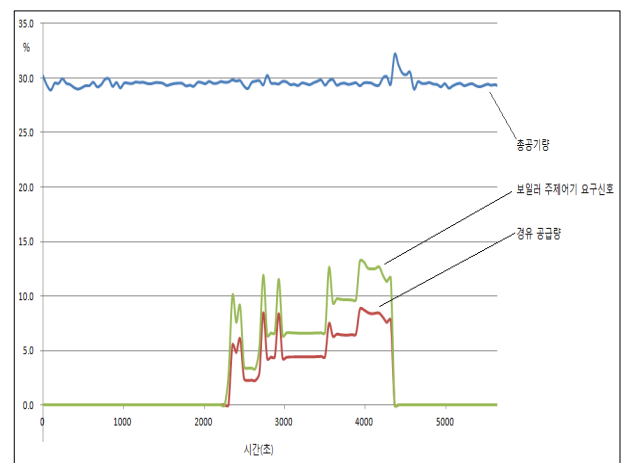


그림 16 최초점화  
Fig. 16 Initial firing

### 2.7.2 최초 병입

최초점화에 성공하여 발전기를 전력계통에 병입하기 위한 최초병입을 그림 17과 같이 수행하였다. 우선 보일러에 공급하는 연료, 공기, 급수를 안정적으로 운전제어하고, 유량을 증가시켜 생산한 증기를 이용하여 터빈을 3600[rpm]으로 회

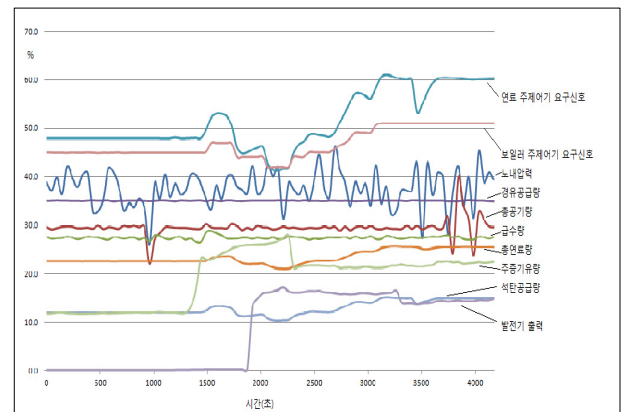


그림 17 최초병입  
Fig. 17 Initial synchronization

전시커 발전기에서 생산하는 전력을 전력계통에 최초로 연계하였다. 보일러 주제어기 및 연료 주제어기 요구신호 23[%], 경유 12[ton/hr], 석탄 22[ton/hr], 주증기 유량 520[t/h]인 상태에서 최초로 전력계통에 병입하여 모든 공정 변수가 정상적으로 운전제어되었다.

### 2.7.3 발전기 출력변동 시험(Load Swing)

발전기 출력을 500[MW], 450[MW] 구간에서 지속적으로 변동시키면서 연료, 공기, 급수의 응동상태를 확인하였으며, 발전기 출력이 전력요구신호에 따라 정상적으로 운전제어되는지를 그림 18과 같이 시험하였다. 발전기 출력의 충분한 출력변동을 확보하면서도 과도한 오버슈트나 언더슈트가 발생하지 않도록 하기 위하여 연료주제어기 요구신호가 급격히 변하였으며 연료가 이에 상응하여 잘 운전제어되는 것을 확인하였다.

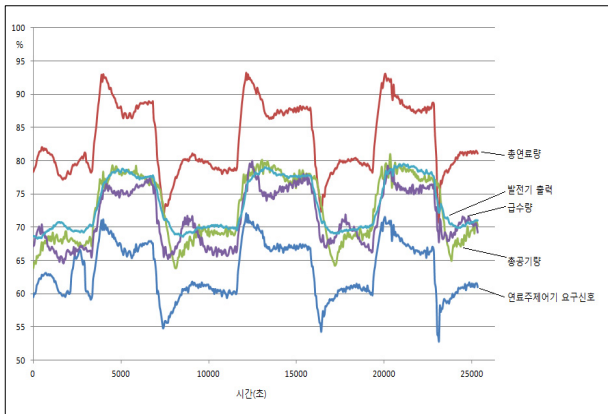


그림 18 발전기 출력 변동 시험  
Fig. 18 Load swing test

### 2.7.4 런백시험(Runback test)

보일러 연료를 연소하기 위한 연소용 공기를 공급하는 압입통풍기 #A, B 두 대 중 #A 1대를 불시에 정지하는 런백 시험을 수행하였다. 이 외에도 1차통풍기, 유인통풍기, 급수 펌프 등도 1대씩 정지하는 불시정지시험을 수행하였다. 발전기 정격 출력인 78[%]에서 압입통풍기 두 대 중 한 대가 정지하면 연료, 공기, 급수가 절반정도로 설정된 값에 따라 유량이 감소하여 발전기 출력이 절반으로 감소하게 된다. 이때 연료는 연료주제어기 요구신호에 따라 감소하지 않고 런백신호에 따라 미분기 6대 중 보일러 노 상부에 연료를 공급하는 미분기부터 순차적으로 정지하여 4대가 정지함으로써 연료공급량을 감소시킨다. 발전기 출력이 내려가 런백이 종료되면 다시 연료주제어기 요구신호에 따라 연료량을 제어하는데 그림 19의 연료주제어기 오른쪽에 하강한 부분이 해당된다. 런백시 연료량이 신속히 감소하지 않을 경우, 보일러 주증기 압력, 온도 상승, 폭발 우려 등으로 인해 보일러를 보호하기 위한 발전소 정지가 불가피하게 된다[3]. 잦은 발전소의 기동과 정지는 발전소의 수명을 단축하며, 전력거래 및 불필요한 연료의 손실을 초래한다. 또한 불시 정

지로 인한 전체 전력계통의 불안정을 초래하므로 고장시 런백을 성공적으로 운전제어하는 것은 전력설비의 안정운전에 중요한 요소로 작용한다. 런백시험을 성공적으로 수행함으로써 발전소 연료제어의 신뢰성을 확인하였다.

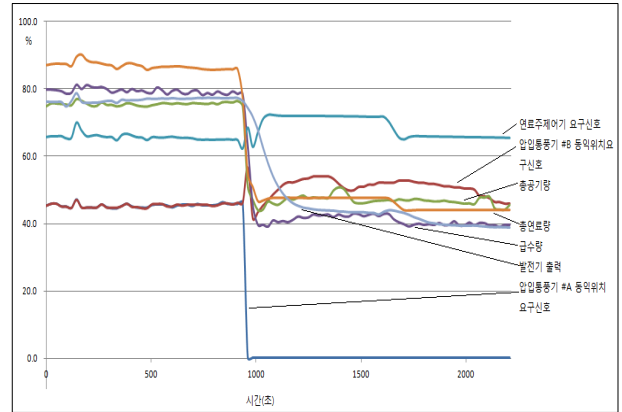


그림 19 런백 시험  
Fig. 19 Runback test

## 3. 결 론

본 논문에서는 500[MW]급 석탄화력발전소 보일러 연료 제어 알고리즘의 개발과정을 설계, 코딩, 시뮬레이터의 구성, 분산제어시스템의 구성, 모의시험, 현장설치, 현장시험 단계로 기록하였다. 시험단계에서 이미 개발한 500[MW]급 석탄화력발전소 시뮬레이터를 사용하였으며, 기존 발전소에서 운영할 수 있을 정도의 시험을 수행하여 신뢰성을 확보하였다. 보일러 연료제어 알고리즘은 다른 분산제어시스템과의 연동을 위하여 많은 신호를 연계하여 수차례에 걸쳐 종합시험을 완료하였다. 신뢰성을 확보한 분산제어시스템은 발전소 현장에 설치하여 현장설비와 연계하여 최초점화, 최초병입, 발전기 출력변동 시험, 런백시험 등 각종 운전제어 신뢰성 시험을 통해 설비의 안정성을 검증하였다. 현재 분산제어시스템과 설치한 제어로직 알고리즘을 정상적으로 운영하고 있으며, 10일간의 연속운전을 통해 신뢰성을 검증함으로써, 전력계통에 연계하여 성공적으로 상업운전을 하고 있다.

본 연구는 이제까지 외국기술로 제작, 설치되어 왔던 500[MW]급 석탄화력발전소의 제어알고리즘과 분산제어시스템을 국산화 적용하기 위하여 정부에서 추진한 사업으로서, 성공적으로 완료되어 국내의 신규 및 개조 발전소의 안정적인 운영과 화력발전기술의 국내자립뿐만 아니라 해외 발전소 사업에도 기여할 것으로 기대한다[1].

### 감사의 글

본 연구는 2010년도부터 지식경제부 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행 중인 연구과제로 관계부처에 감사 드립니다.



## 참 고 문 헌

- [1] 임건표, 이흥호, “석탄화력발전소 보일러 연소용 공기 제어 알고리즘의 개발”, 대한전기학회논문지, 제61P권, 4호, pp. 153-160, 2012. 12.
- [2] 임건표, 이흥호, “대용량 증기발생기를 제어하기 위한 최상위 보일러 주제어기의 생성”, 한국조명전기설비학회, 2011춘계학술대회 논문집, pp. 196, 2011. 5.
- [3] SAM G. Dukelow, The Control of Boilers, 2nd Edition, The Instrumentation, Systems and Automation Society, pp. 133-135, 299, 1991.
- [4] 김진곤, 김치원, 송규근, 양협, 유경선, 정태용, 채수, 연소공학, 북스힐, pp. 85, 2005.
- [5] 육심균, EWS Logic & Loop Drawing R0, 두산중공업, pp. 81, 2011.
- [6] 임건표, 박두용, 김종안, 이흥호, “발전소 보일러 급수 주제어 시스템의 개발”, 대한전기학회논문지, 제61권 3호, pp. 447, 2012. 3.

---

## 저 자 소 개



### 임 건 표 (林 建 杓)

2010년 충남대 전기공학과 대학원 졸업.

현재 한전전력연구원 선임연구원.

Tel : 042-865-5603

E-mail : kepcolim@kepco.co.kr



### 이 흥 호 (李 興 浩)

1994년 서울대 컴퓨터공학과 대학원 졸업(박사),

현재 충남대학교 전기공학과 교수 및 산업대학원 원장

Tel : 042-821-5656

E-mail: leehh@cnu.ac.kr