

석탄화력발전소 보일러 연소용 공기 제어알고리즘의 개발

The Development of Boiler Combustion Air Control Algorithm 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 of boiler combustion air control algorithm of coal-fired power plant by the steps of design, coding and test. The control algorithms were designed in the shape of cascade control for two parts of air master, forced draft fan pitch blade by standard function blocks. This control algorithms were coded to the control programs of distributed control systems under development. The simulator for coal-fired power plant was used in the test step and automatic control, sequence control and emergency stop tests were performed successfully like the tests of the actual power plant. The reliability will be obtained enough to apply to actual site if the total test has been completed in the state that all algorithms were linked mutually. It is expected that the project result will contribute to the safe operation of domestic power plant and the self-reliance of coal-fired power plant control technique.

Key Words : Control, Algorithm, Air, DCS, Cascade, Coal-fired, Power plant

1. 서 론

1994년경 국내 최초로 설치된 500MW급 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[1]. 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[2]. 최근 발전소의 대용량화 및 고효율화에 따라 자동제어시스템은 점차 고도화되어 가고 있다. 발전소 자동제어시스템의 중요성이 점차 부각되고 있으나, 국내에서는 여전히 제어시스템 자체 및 기술을 대부분 외국 선진기술에 의존하고 있다. 이에 본 연구에서는 핵심기술의 자립 및 기간산업의 안정적 운영 측면에서 대용량 석탄화력발전소의 분산제

어시스템에 적용할 수 있도록 국내기술로 하드웨어와 소프트웨어를 개발하고 있다. 최근까지 국내에서도 제어알고리즘을 개발하여 적용한 예는 빈번이 있었으나 대형 석탄화력 발전소에 적용하기 위하여 분산제어시스템의 하드웨어와 소프트웨어를 동시에 개발하는 경우는 이번이 처음이다.

본 논문에서는 대용량 석탄화력 발전소 보일러 연소용 공기 제어용 표준알고리즘을 개발하여 국산화 중인 분산제어시스템 프로그램에 맞게 코딩하여 탑재한 후 자동제어, 시퀀스 제어, 불시정지 등을 성공적으로 모의시험한 내용을 기록하였다[3~8]. 이 알고리즘은 다른 알고리즘과 함께 실제로 발전소에 설치, 운영할 분산제어시스템 전체에 설치하여 종합 모의시험을 완료한 후 발전소 주제어설비를 운영하는데 사용할 계획이다.

2. 본 론

2.1 연소용 공기 계통

화력발전소는 그림 1과 같이 보일러와 터빈으로 구성되어 있으며 이를 제어하기 위한 최상위 제어기로 보일러 주제어기와 터빈 주제어기를 가지고 있다. 보일러 주제어기와 터빈 주제어기를 총칭하여 유니트 주제어기라고 한다. 보일러 주제어기는 보일러에서 필요한 공기, 연료, 급수를 제어하는 각 주제어기에 상위제어 신호를 내보낸다 [2].

공기는 연료를 건조하고 운반하는 1차공기와 보일러에서 연료를 연소하기 위한 연소용 공기가 있다. 그림 1에서 연소용 공기는 압입통풍기(FDF-A, B)로 공급하는데 국내 500MW 표준석탄화력발전소는 그림 2와 같이 축류형 팬을 사용하며 두 대로 구성되어 그림 3과 같이 보일러(Boiler)로 공급된다.

* 정 회 원 : 한전전력연구원 선임연구원

† 교신저자 : 충남대 전기공학과 교수

E-mail : leehh@cnu.ac.kr

접수일자 : 2012년 5월 30일

최종완료 : 2012년 10월 10일

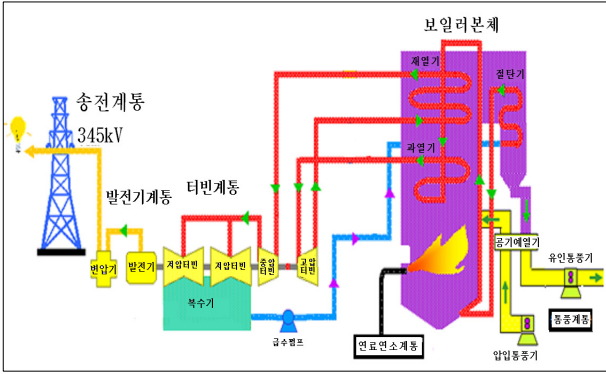


그림 1 발전소 전체 구성
Fig. 1 Entire configuration of power plant

보일러 주제어기 신호를 받은 연소용 공기 제어 알고리즘에서는 보일러에서 필요한 공기유량을 결정하고 그림 2의 압입통풍기 동익(Pitch Blade) 위치요구신호를 생성한다. 동익 구동용 전동기 액추에이터는 유압장치의 구동용 오일(Lube Oil) 흐름을 제어하며, 유압장치의 방향을 제어하여 동익 각도를 조절한다.

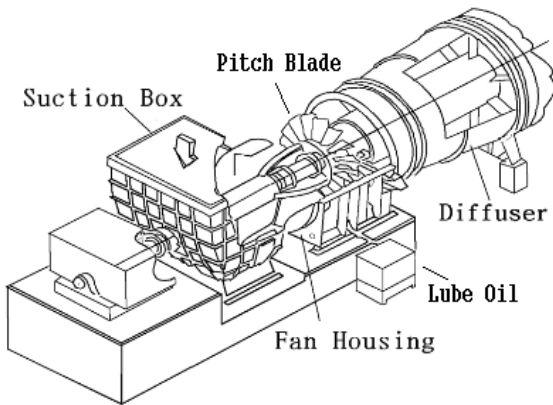


그림 2 축류형 압입통풍기
Fig. 2 Axial forced draft fan

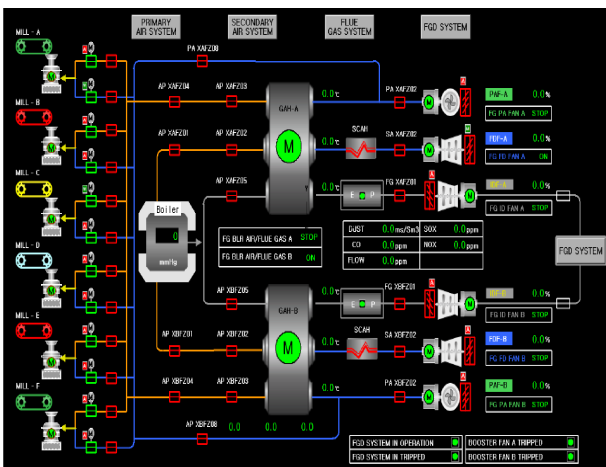


그림 3 공기 및 배기가스 계통도
Fig. 3 Air and flue gas system

그림 3은 개발 중인 분산제어시스템의 운전원 워크스테이션에 구성된 공기 및 배기가스의 발전소 전체 흐름을 나타내는 화면이다. 두 대의 압입통풍기(FDF-A, B)에서 공급하는 연소용 공기는 공기예열기(GAH-A, B)를 지나면서 배기가스의 여열을 이용하여 온도를 높인 후 보일러에서 연료를 연소하는데 사용된 후 다시 공기예열기 배기가스로 배출된다.

2.2 제어 알고리즘의 설계

그림 5와 6은 각각 연소용 공기 주제어기 알고리즘, 압입통풍기 등의 제어 알고리즘의 전체구성을 나타낸다. 그림 5와 6의 제어 알고리즘은 현장 제어기와 함께 그림 4의 3단 캐스케이드 제어를 한다[3]. 그림 5가 1차 제어로 그림 4의 C1에 해당되며 프로세스 P1은 연소용 공기유량이다. 그림 6은 2차 제어로 그림 4의 C2에 해당되며 프로세스 P2는 압입통풍기 동익위치이다. C3은 현장 동익을 제어하는 전동기

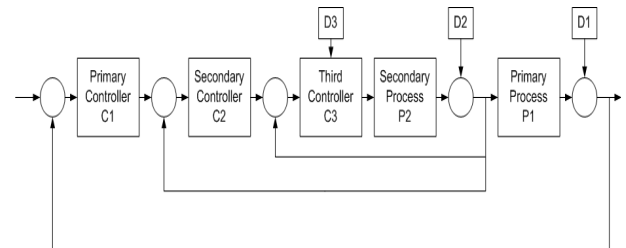


그림 4 캐스케이드 제어
Fig. 4 Cascade control

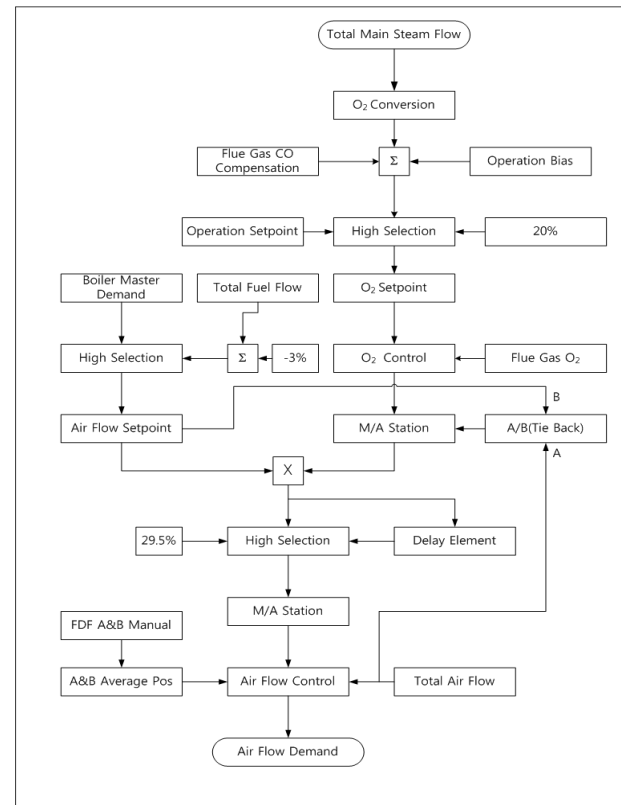


그림 5 공기 주제어기 알고리즘 전체구성
Fig. 5 Entire configuration of air master algorithm

액추에이터 구동용 제어기이며 프로세스는 P2 동익위치이다. 1차제어 외란 D1은 온도와 압력 변화, 공기유량 측정 도압관의 막힘으로 인한 오지시 등이고 D2는 액추에이터 고장, 동익 위치회환신호 고장, 동익구동장치 고장 등이며, D3은 구동장치 유격에 의한 동익의 흔들림, 진동에 의한 동익 이동, D2와 같은 설비 고장 등이 해당된다. C2는 C1의 공기유량 요구신호에 따라 동익을 제어하며, C3은 C2의 동익위치요구신호와 실제 동익위치간에 오차가 발생하면 전동기 액추에이터를 구동하여 동익을 움직이는 역할을 한다. 따라서 공기유량은 변하지 않으나 D3에 의해 동익위치가 동익위치요구신호와 오차가 발생할 경우, C2의 출력은 변하지 않으나 C3은 즉시 오차를 제거하기 위하여 전동기 액추에이터 구동용 제어기 출력을 증감한다. 반면 공기유량이 변하여 C2의 출력인 동익위치요구신호가 변하였으나 P2가 변하지 않을 경우 C2는 계속 변하게 된다.

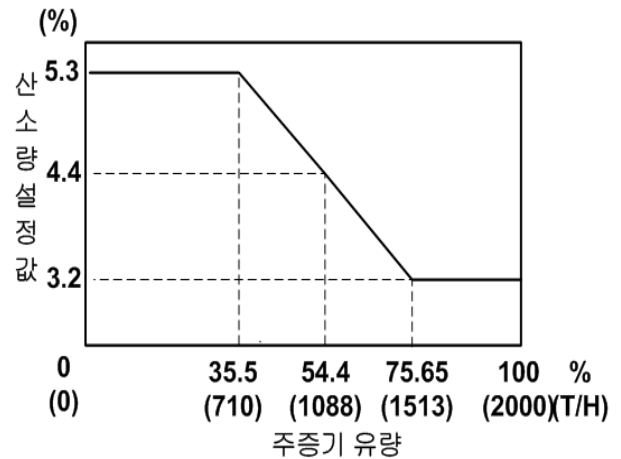


그림 7 주증기 유량 대비 산소량 설정값
Fig. 7 Main steam flow vs oxygen flow setpoint

위에서 생성한 산소량 설정값은 배기가스 일산화탄소 보상(Flue Gas CO Compensation) 및 운전원 바이어스(Operation Bias)를 -12~12% 범위로 합산하여 운전원이 직접 가감할 수 있도록 하였다. 이 값은 운전원이 20~100%로 직접 입력하는 설정값(Operation Setpoint)과 최소 설정값 20%와 비교하여 최대값을 선택하여 최종 산소량 설정값을 결정한다. 실제 산소량(Flue Gas O2)은 공기에열기를 지나기 직전의 배기가스 덕트 #A/B에서 각각 세 포인트를 0~10%로 측정하여 평균값을 사용한다. 산소량 설정값과 실제 산소량은 PI 제어기(O2 Control)로 입력하여 제어하며 추후 연소용 공기량 설정값에 비율적으로 적용하기 위하여 85~120%로 제한한다[4].

자동수동모드를 제어하기 위하여 PI 제어기 아래 자동수동절환기(M/A Station)를 두었다. 압입통풍기 #A/B가 모두 수동모드로 절환되면 타이백(Tie Back) 신호를 추종한다. 타이백 신호는 압입통풍기 수동모드 운전시 운전원이 주고 있는 총 공기유량(Total Air Flow)과 로직에서 산출한 프로그램 공기유량 요구신호(Program Air Flow Demand(Air Flow Set point))와의 차이를 해소하기 위한 신호로 총 공기유량/프로그램 공기유량 요구신호(Total Air Flow/Program Air Flow Demand) 비율로 프로그램 공기유량 요구신호를 수정(Correction)한다. 단 공기유량 최소(Air Flow Minimum) 영역인 26% 이하에서는 수정동작을 하지 않고 100%(26%/26%)로 둔다[4].

공기유량을 설정할 때 연료량보다 공기가 적게 공급되어 불완전 연소되는 것을 막기 위해 제한값(Fuel/Air Cross Limit)을 설정하는데 연료에 필요한 공기유량 설계값의 -3%까지 허용한다. 이 값은 보일러 주제어기 신호(Boiler Master Demand, BM DMD)와 비교하여 큰 값을 선택하여 그림 8과 같이 프로그램 공기유량 설정값(Air Flow Setpoint)을 생성한다.

공기유량 설정값은 산소량 설정값의 자동수동절환기 출력과 곱해 85~120% 범위로 산소량 보정을 한다. 이론상의 공기량은 식 1과 같이 얻을 수 있다. TRCA는 연료 10,000[BTU]에 대한 이론상의 연소용 공기량이며, C, H2, O2, S는 연료에 포함된 탄소, 수소, 산소, 황의 퍼센트 비율이다[5].

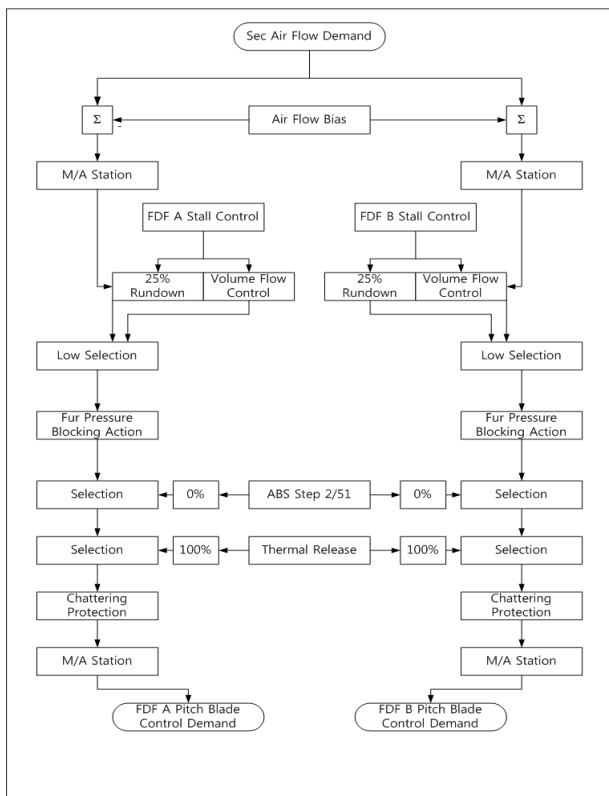


그림 6 압입통풍기 동익 제어 알고리즘 전체구성
Fig. 6 Entire configuration of control algorithm of pitch blade of forced draft fan

공기유량을 설정하기 위한 배기가스 덕트의 산소량 설정값을 생성하기 위하여 0~2000t/h로 측정된 주증기 유량을 0~100%로 입력하여 그림 7과 같이 산소량 변환(O2 Conversion)을 통해 산소량 설정값(O2 Setpoint)을 생성한다. 주증기는 보일러에서 생성되어 터빈을 회전시키는 기계적 힘을 발생하고, 터빈이 회전되면 발전기가 회전하여 필요한 전력을 생산하게 되는데, 산소량 설정은 주증기를 생성하기 위한 보일러 연료량에 적합한 연소용 공기량을 생성하는데 보정신호로 사용한다.

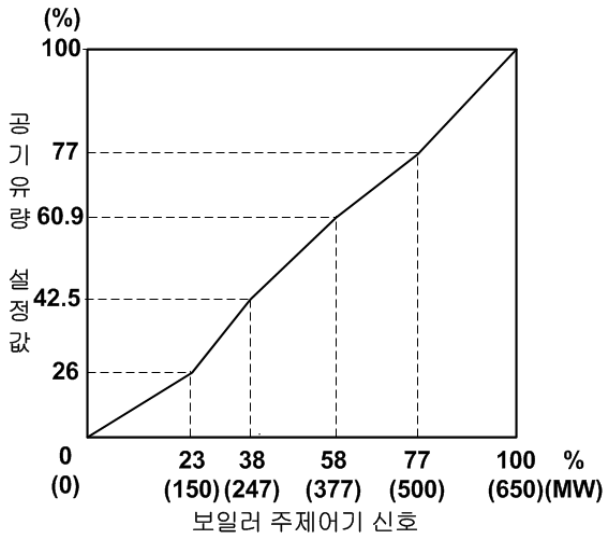


그림 8 보일러 주제어기 신호 대비 공기유량 설정값
Fig. 8 Boiler Master Demand vs air flow setpoint

$$TRCA = 11.53C + 34.34 \left(H_2 - \frac{O_2}{8} \right) + 4.29S \quad (1)$$

이론상 공기량으로 공기유량을 설정할 경우, 일부 연료는 연소가 되지 않고 불완전연소가 되며, 미연탄소분에 의한 열손실이 발생할 것이다. 따라서 완전연소를 하기 위해서는 연료의 모든 분자가 완전연소를 할 수 있도록 적절한 양의 산소분자와 결합할 수 있도록 추가적인 공기를 제공해야 하는데 이를 과잉공기라 하며 이를 위해 산소량 보정을 한다. 과잉공기는 식 2와 같이 구할 수 있다. EA는 과잉공기, K는 연료에 따른 비례상수로 석탄에 대해서는 0.97이다. 식 2에 따른 석탄의 과잉공기는 25~40%이며, 이는 배기가스 중 산소 4~6.5%에 해당되는데 그림 7의 산소 설정값에 해당된다[5].

$$EA(5) = K \left(\frac{21}{21 - \%Oxygen} - 1 \right) \times 100 \quad (2)$$

지연요소(Delay Element)는 연료량에 대해 충분한 공기(Air Rich)량을 확보하기 위한 기능으로 부하 감소시 공기유량 감소를 지연시킨다. 단 발전소 출력감발시에는 지연이 거의 되지 않도록 하였다[4]. 부하 감소에 따라 연료량 설정값이 감소하면 석탄을 미분기로 공급하는 계통의 급탕기 공급속도가 감소하며, 급탕기로부터 공급받은 석탄을 분쇄하여 미분탄 이송관으로 내보내는 미분기의 미분탄 공급량이 감소하며, 미분탄은 미분기 출구에서 미분탄 이송관을 거쳐 최종적으로 보일러에서 연소되는 과정으로 연소가 지연된 상태로 감소한다. 따라서 이러한 지연요소는 세 부분으로 구성하여 식 3과 같은 형태의 지연요소를 구성한다. DE는 지연요소, DE1은 급탕기에서의 지연, DE2는 미분기에서의 지연, DE3는 미분탄 이송관에서의 지연을 나타낸다. DE1, DE2, DE3은 식 4의 DE123과 같은 형태로 구성하며, 실제운전을 통해 지연시간 T를 조정함으로써 적절한 공기량을 확보한다.

$$DE = DE1 \times DE2 \times DE3 \quad (3)$$

$$DE_{123} = \frac{1}{1 + Ts} \quad (4)$$

공기유량 설정값은 최소 공기유량인 29.5%와 산소량 보정을 한 공기유량 설정값, 지연요소를 지난 값 중 최대값을 선택한다.

이후 자동수동절환기에서는 압입통풍기 #A/B 수동모드시 타이백으로 실제 총 공기유량을 추종하도록 하였다. 자동수동절환기가 공기유량 PI 제어기(Air Flow Controller)의 전단에 위치하여 수동모드 운전시에도 제어 상태를 유지한다.

공기유량 PI 제어기는 압입통풍기 #A/B 수동모드시 압입통풍기 #A/B 동익 위치요구신호의 평균값을 추종한다. 실제동익위치신호를 사용할 경우 동익위치신호 측정에 이상이 발생하게 되면 제어불능상태가 될 수 있다. PI 제어기의 시간응답이 없는 경우 최대값 선택(High Selection) 출력과 이 출력의 미분값인 공기량 가속(Air Acceleration)을 합한 값에 1차공기 유량에 37%를 감한 값을 출력으로 내보낸다. 총 공기유량은 연소용 공기유량에 1차공기 유량을 합산한다[4]. 따라서 압입통풍기 동익 위치요구신호의 선행신호에는 1차공기 유량을 감해주어야 한다.

총공기유량은 0~560M3/S의 측정범위를 가지며 연소용 공기인 2차공기 유량은 0~500M3/S, 1차공기 유량은 56.2M3/S의 범위를 갖는다. 총공기유량 중 1차공기 11%, 2차공기 89%, 1차공기 11%중 2.1%가 미분기 밀봉공기 팬(Mill Seal Air Fan), 미분기 6대중 5대가 통상 운전되므로 1차공기 중 5/6가 7.41%로 구성된다.

공기 유량의 온도, 압력 보정 원칙은 다음과 같다. 일반적으로 공기유량과 압력의 변동은 100mmH2O 정도로 온도 보정만 한다. 미분기 입구 공기유량의 압력 변동은 1000mmH2O 정도로 온도 및 압력 보정을 동시에 보정한다.

공기유량의 온도보정은 식 5와 같으며 설계온도를 20℃일 경우 그림 9와 같다[4]. KT는 식 7의 온도보정상수, TD는 설계온도, TM은 측정온도이다.

$$K_T = \sqrt{\frac{273.15 + T_D}{273.15 + T_M}} \quad (5)$$

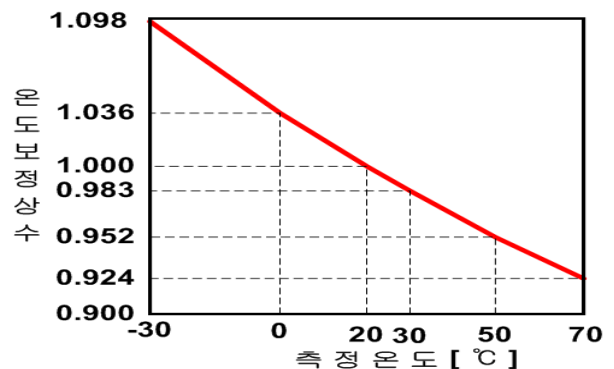


그림 9 공기유량 온도보정
Fig. 9 Air flow temperature compensation

공기유량의 압력보정은 식 6 및 그림 10과 같다[4]. KP는 식 7의 압력보정상수, PM은 측정압력, PD는 설계압력이다.

$$K_p = \sqrt{(1.0332 + P_M) / (1.0332 + P_D)} \quad (6)$$

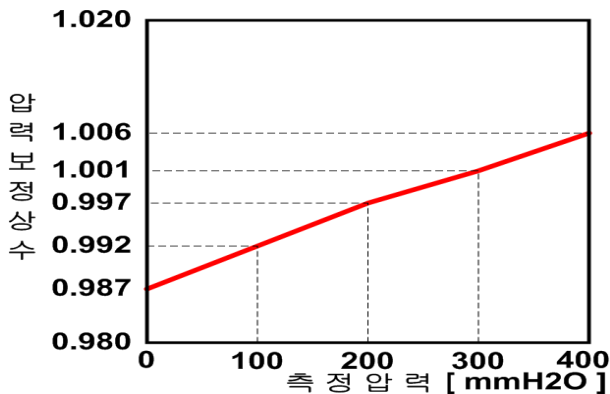


그림 10 공기유량 압력보정
Fig. 10 Air flow pressure compensation

일부 시스템의 유량에 대한 온도, 압력 보정은 물/증기용, 가스용, 가변기준압력 기반의 가스용으로 구분하여 사용하기도 하며 유량을 계산하는 식은 식 7과 같다. 반면 일부 시스템에서는 기능블록을 조합하여 구현한다[4].

$$Q = K\sqrt{\Delta P} / \sqrt{\rho} \quad (7)$$

- $\rho = 1/V$
- Q=Volume Flow Rate
- K=KTKp=Constant
- ΔP =Differential Pressure
- ρ =Density
- V=Specific Volume

그림 5의 공기유량 요구신호(Air Flow Demand)는 그림 6의 2차공기량 요구신호(Sec Air Flow Demand)로 입력하여 압입통풍기의 동익위치 요구신호를 생성하는데 사용한

다. 요구신호는 압입통풍기 #A, B 두 대로 나뉘어 가게 되는데 압입통풍기의 위치귀환신호 편차를 해소시키기 위해 공기유량 바이어스(Air Flow Bias)를 두었다. 범위는 -5~+5%이며 #B측은 +, #A측은 -로 작용한다. #A와 B 모두 자동모드로 전환되어 60초 후 1초간은 바이어스가 #A/B 위치귀환신호 편차에 따라 자동 조절된다. #A와 B 모두 자동모드가 아닌 경우 바이어스는 수동모드로 절체된다. #A와 B 모두 수동모드인 경우 바이어스는 0으로 설정된다.

상부 자동수동절환기를 지난 신호는 실속경보(Stall Warning)에 의한 런다운(Rundown) 신호 발생시 25%로 바뀐다. 또한 압입통풍기 위치 최대 제한값 도달(FDF Position Limit Max On) 신호 발생시 압입통풍기 최적 유량(FDF Volume Flow)에 따른 동익 위치 최대 제한값(Vane Position Max Limit)으로 바뀌게 된다.

보일러는 노내 가스압력을 항상 약간의 부압을 유지하여 공기손실 및 회 누설을 막아야 한다. 부압이나 정압이 설계값 이상으로 발생할 경우 심각한 손상을 입게 된다. 보일러 압력은 압입통풍기에서 공급하는 공기와 배기가스를 배출하는 유인통풍기가 상호 보완적인 평형통풍방식으로 제어하여 운전한다. 노내 가스압력이 증가할 경우 동익위치요구신호를 증가시키는 동작을 차단하며, 반대로 감소할 경우 위치요구신호를 감소시키는 동작을 차단하도록 하였다.

보일러 열적 허용값(Thermal Release)에 비해 공기유량이 50%이상 적을시 동익을 개방하여 불완전 연소를 방지하는 보호기능을 구성하였다. 또한 자동수동 절환기 전단에 압입통풍기 위치귀환요구신호와 위치귀환신호간에 편차가 10% 이내일 경우 위치귀환신호를 추종하여 빈번한 흔들림(Chattering)을 방지하여 제어설비를 보호하도록 하였다.

2.3 제어로직 코딩

설계한 연소용 공기 제어 알고리즘은 자동제어로직, 순차제어로직으로 구성되어 있으며, 표준심볼로 제작하여 어느 시스템에도 코딩하여 적용할 수 있도록 하였다. 표준심볼로직은 그림 11과 같이 개발 중인 분산제어시스템에서 사용

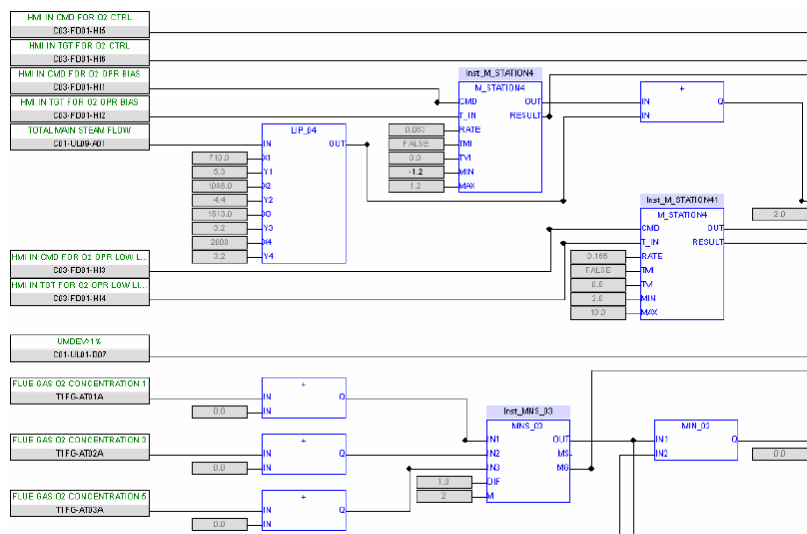


그림 11 코딩작업을 수행한 연소용 공기제어 알고리즘의 일부
Fig. 11 Part of coded combustion air control algorithm

하는 스트라톤(Straton IEC61131-3 개발환경) 프로그램으로 코딩하였다[6~7]. 코딩한 로직은 모의시험을 하기 전 설계 제어로직과 비교 검토하여 모의시험 중에 발생하는 빈번한 로직수정 작업을 최소화하였다[8].

2.4 시뮬레이터의 구성

코딩한 제어로직을 시험하기 위하여 그림 12와 같은 시뮬레이터를 개발하여 이용하였다[7].

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[7]. 시뮬레이터의 공정모델은 실행파일이 C++ 알고리즘인 쓰리키마스터(3Keymaster)를 사용하였다. 시뮬레이터에는 실제 발전소에 설치하게 될 제어알고리즘을 설치한 분산제어시스템을 통신을 통해 연결하여 시험할 수 있도록 그림 12의 입출력 신호 랙(IO Rack # 1~3)을 구성하였다. 입출력 신호 랙은 랩뷰(Labview) 프로그램으로 개발된 인터페이스 시스템이다[8]. 시뮬레이터는 제어모델과 공정모델이 연결되어 있으며 제어모델 중 연소용 공기 제어알고리즘 부분을 공정모델에서 분리한 후, 코딩한 연소용 공기 제어알고리즘이 설치된 분산제어시스템을 시뮬레이터에 하드 와이링(Hard Wiring)으로 연결하였다.

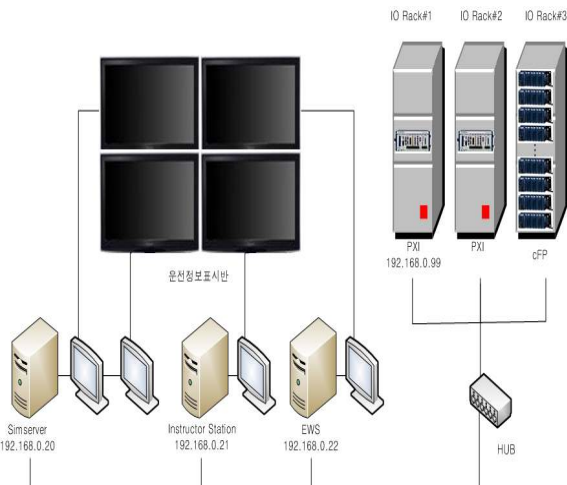


그림 12 시뮬레이터 구성도
Fig. 12 Simulator configuration

2.5 분산제어시스템의 구성

제어모델과 공정모델로 구성된 시뮬레이터에 그림 13과 같이 보일러 분산제어시스템 패널 1 세트, 터빈 분산제어시스템 패널 1 세트로 구성된 실제 패널을 신호선으로 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 12의 엔지니어링 워크스테이션(EWS)을 통해 그림 13의 프로세스 카드에 설치한 후 시뮬레이터의 공정모델에 연결하여 실제 발전소 형태로 시험을 하였다[7~8].

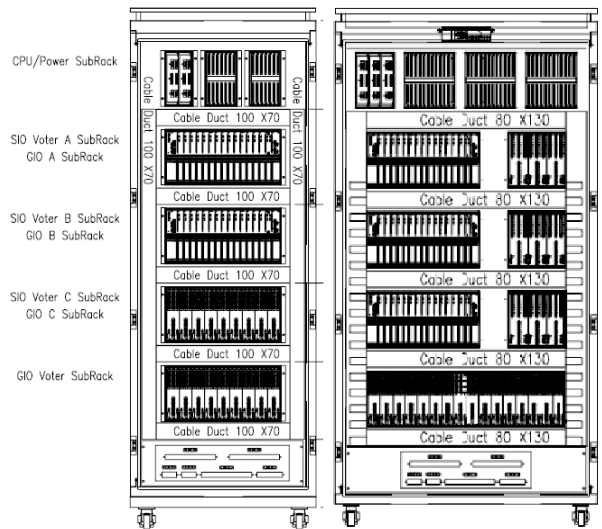


그림 13 시뮬레이터 분산제어시스템 패널
Fig. 13 Distributed control system panel for simulator

2.6 시험

연소용 공기 제어 알고리즘은 다음과 같은 항목으로 구분하여 시험하였다. 보일러 마스터 2차 공기 요구량 신호 설정, 2차공기 요구량 보정, 산소보정신호를 적용한 공기 요구량, 2차 공기 요구량 자동/수동 전환기, 2차 공기 PI 제어기 등 그림 5, 6의 각 부분을 개별 시험하고 전체적인 알고리즘의 운용상태를 자동제어로직, 순차제어로직, 출력감발로 구분하여 시험 확인하였다.

그림 14는 그림 6의 공기유량 바이어스(Air Flow Bias)

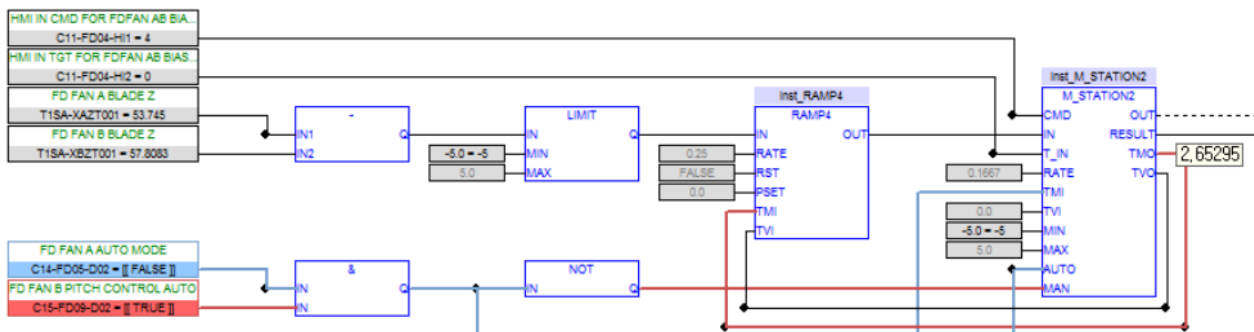


그림 14 자동제어로직 시험 일부분(공기유량 바이어스)
Fig. 14 Part of automatic control logic test(air flow bias)

부분을 시험 한 결과를 보여주고 있다. 압입통풍기 #A, B 중 어느 하나가 수동으로 절체될 경우 바이어스는 운전원이 수동으로 조작할 수 있으며, 5% 이상을 줄 경우 $\pm 5\%$ 범위로 제한되어 출력되는지를 확인하였다. #A, B 모두 수동으로 절체될 경우 바이어스가 "0"으로 설정되는지를 확인하였다. 이러한 형태의 시험을 통해 코딩한 결과 및 개발한 기능블록(Function Block)이 제대로 동작하는지 여부, 파라미터 오류 등을 확인하였다.

자동제어로직 시험을 마무리하고 순차제어로직을 시험하였다. 순차제어로직은 압입통풍기 기동, 정지 로직, 동의 구동 작동유 펌프 제어로직, 작동유 히터 제어로직 등으로 구성되어 있다. 그림 15는 순차제어로직 중 압입통풍기 기동 로직의 기동 단계 6단계 중 3단계가 완료된 것을 보여주고 있다. 3단계는 1, 2단계가 운전조건의 성립으로 마무리된 상태에서 동의 위치귀환신호 최소값으로 닫혀 있고, 동의 제어모드가 수동상태이며, 압입통풍기 출구 댐퍼 차단기가 개방상태인 조건이 성립되면 완료된다. 그림 15, 16은 각각 순차제어기동 및 정지 결과를 보여주고 있다. 그림 15에서 압입통풍기 #A가 기동하면서 총 공기유량을 제어하기 위해 #B

동의위치귀환신호가 감소한 것을 볼 수 있다. 그림 16에서는 압입통풍기 #A를 정지하면서 총 공기유량을 제어하기 위해 #B 동의위치귀환신호가 증가한 것을 볼 수 있다. #B 동의위치귀환신호가 100%로 올라간 결과로 제어기 튜닝이 필요한 것을 알 수 있으나, 제어알고리즘은 문제없이 설계된 것을 확인하였다. 튜닝은 전체 분산제어시스템 패넌을 시뮬레이터 공정모델과 연계하여 수행할 계획이다. 이러한 방법으로 모든 순차제어로직 시험을 마무리하였다.

다음으로 압입통풍기 두 대 중 한 대가 불시에 정지되었을 경우를 시험하는 런백시험(Runback Test)을 시행하였다. 통풍기가 불시에 정지될 경우 불완전 연소로 남게 된 연료로 인한 설비고장이 발생할 수 있다. 따라서 신속하게 연료를 감소시키면서 터빈을 회전시키는 보일러 주증기 유량을 감소시키게 되는데 이때 남은 한 대의 압입통풍기로 공기유량을 안정적으로 공급할 수 있어야 한다. 그림 17, 18은 각각 압입통풍기 #A, B의 런백시험 결과를 보여주고 있다.

그림 17에서 압입통풍기 #A가 정지하면서 압입통풍기 #B 동의이 열리면서 총 공기유량을 충분히 제어하여 급감한 총 공기유량을 총 연료량과 발전기 출력이 감소함에 따라 서서

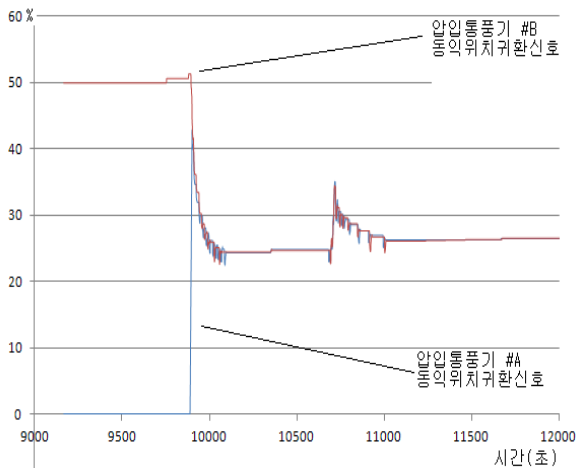


그림 15 압입통풍기 #A 순차제어 기동
Fig. 15 Start-up by sequence control of forced draft fan #A

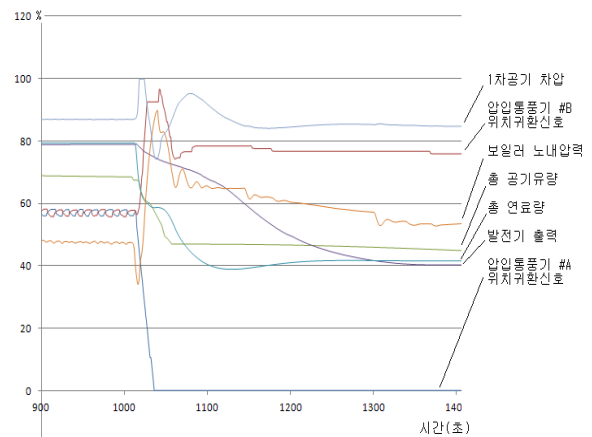


그림 17 압입통풍기 #A 런백시험 결과
Fig. 17 Runback test result of forced draft fan #A

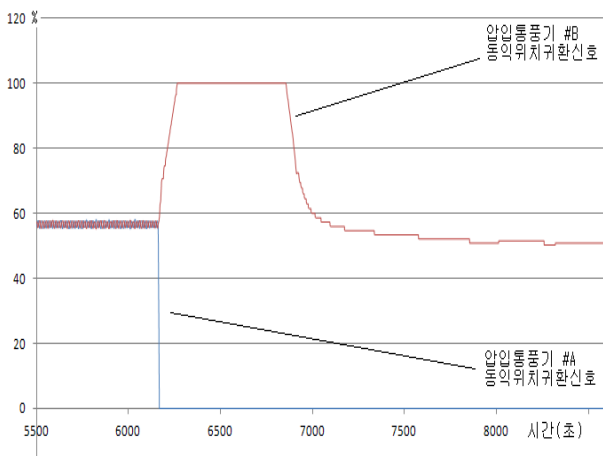


그림 16 압입통풍기 #A 순차제어 정지
Fig. 16 Stop by sequence control of forced draft fan #A

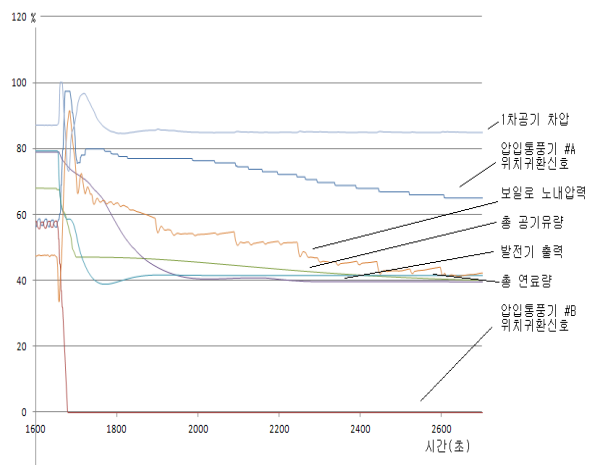


그림 18 압입통풍기 #B 런백시험 결과
Fig. 18 Runback test result of forced draft fan #B

히 감소하도록 제어하는 것을 볼 수 있다. 이때 1차공기 차압은 적절히 되었으나 보일러 노내 압력은 정압쪽으로 많이 올라가 노내압력을 제어하는 유인통풍기 제어알고리즘을 추후 튜닝을 통해 안정적으로 제어할 수 있도록 해야 할 부분으로 판단하였다.

그림 18은 압입통풍기 #B에 대한 런백시험 결과로 압입통풍기 #A와 비슷한 결과를 보여주었다.

자동제어로직 시험, 순차제어로직 시험, 런백 시험을 통해 설계한 로직의 건전성을 확인하였다. 추후 분산제어시스템에 전체 알고리즘을 설치하여 종합시험을 통해 정밀튜닝을 시행할 수 있는 기반을 마련하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 500MW급 석탄화력발전소 보일러 연소용 공기 제어알고리즘의 개발과정을 설계, 코딩, 시험 단계로 기록하였다. 시험단계에서 이미 개발한 500MW급 석탄화력발전소 시뮬레이터를 사용하였으며, 기존 발전소에서 운영할 수 있을 정도의 자동제어, 순차제어, 비상정지 등을 시험하여 신뢰성을 입증하였다. 보일러 연소용 공기 제어 알고리즘은 하나의 분산제어시스템 패 널을 구성하며, 다른 분산제어시스템과의 연동을 위하여 많은 신호를 연계한 종합시험을 완료하여야 한다. 현재 전체 분산제어시스템을 시뮬레이터와 신호선 및 통신으로 연계하여 종합시험을 진행 중에 있다. 아직은 루프 검증 단계를 진행하고 있어 정확한 시험 데이터를 얻을 수 없으나 루프 검증이 완료되어 시운전을 진행하게 되면 현장에 적용할 수 있을 만큼의 신뢰성을 확보할 수 있을 것으로 보인다.

본 연구는 이제까지 외국기술로 제작, 설치되어 왔던 500MW급 분산제어시스템을 국산화 적용하기 위하여 정부에서 추진 중인 사업으로서, 성공적으로 추진되어 국내 발전소의 안정적인 운영과 화력발전기술의 국내자립에 기여할 것으로 기대한다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] 임건표, 최인규, 박두용, 정태원, 김진중, “500MW급 석탄화력발전소 보일러 급수펌프 유량 제어기 개발”, 대한전기학회논문지, 제59권, 9호, pp. 1663, 2010. 9.
- [2] 임건표, 김문수, 최인규, 박두용, 김호열, “모델 기반의 화력발전소 발전기 출력제어 프로그램 개발”, 대한전기학회논문지, 제59권 3호, pp. 614, 2010. 3.
- [3] Paul W. Murrill, Ph.D., Fundamentals of Process Control Theory, Instrument Society of America, pp. 137, 2000.
- [4] 임건표, 박두용, 이흥호, “주증기 유량에 의한 발전소 연소용 공기 유량제어”, 한국조명전기설비학회 춘계학술논문지, pp. 192-193, 2011. 5.
- [5] SAM G. Dukelow, The Control of Boilers, 2nd Edition, The Instrumentation, Systems and Automation Society, pp. 65-72, 1991.
- [6] 육심균, EWS Logic & Loop Drawing R0, 두산중공업, pp. 81, 2011.
- [7] 임건표, 박두용, 김종안, 이흥호, “발전소 보일러 급수주제어 시스템의 개발”, 대한전기학회논문지, 제61권 3호, pp. 447, 2012. 3.
- [8] 임건표, 김종안, 최인규, 유광명, 이흥호, “The Development of Primary Air Control Algorithm in 500MW Class Coal-Fired Power Plant”, ICIS2011, 제4권 pp. 174, 2011. 8.

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