

## 화력발전소 관류형 보일러 동특성을 고려한 제어로직 분석

김종안\*, 정창기\*, 최인규\*, 우주희\*\*  
한전전력연구원\*

### Analysis on the Control Logics of a Once-through Boiler in a Power Plant

Jong-An Kim\*, Chang-Ki Jung\*, In-Kyu Choi\*, Joo-hee Woo\*  
Korea Electric Power Research Institute\*

**Abstract** - 발전소를 포함한 플랜트 공정 제어로직 설계에서 제어대상인 공정의 특성을 파악하는 일이 중요한 출발점이라고 할 수 있다. 이 논문에는 국내 가동 중인 500MW 석탄화력발전소의 보일러 제어시스템을 교체할 목적으로 우선 현재의 제어로직을 분석한 내용을 기술한 것이다. 대상 발전소의 보일러는 관류형 초임계압 형식으로서 1990년대 초부터 건설되기 시작한 국내 표준모델 중 하나이다. 표준관류보일러의 일반특성과 제어원리에 대하여 고찰한 내용을 먼저 기술하였으며, 효과적인 제어목표를 달성하기 위해 보일러 특성을 제어로직에 반영한 증기압력제어, 급수유량제어 제어알고리즘을 차례로 기술하였다. 여기에 근거 자료 또는 참고자료로 사용된 그래프 등은 고찰대상인 실제 발전소에서 수집하였다.

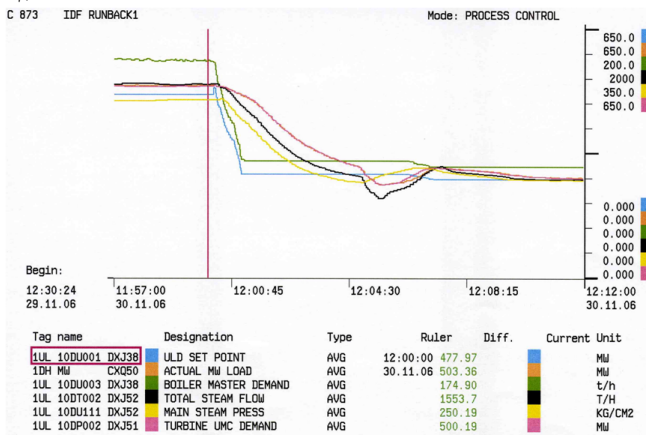
#### 1. 서 론

관류형 보일러에서 제어대상인 주요 공정변수는 출력(MW), 증기압력, 증기온도, 연료, 그리고 연소용 공기이며, 이 변수들을 각각 독립적으로 제어하기 매우 어렵다. 이 변수 간 서로 영향을 미치는 상호작용이 항상 강하게 존재하므로 제어로직 설계와 제어기 튜닝이 상당히 어렵게 된다. 예를 들자면, 증기압력이 변동하는 경우 이 압력을 원하는 값(목표치)으로 유지시키고자 투입 연료량을 변동시키면, 이 연료량의 변동에 의해 급수 량과 증기온도도 함께 변화하게 된다. 그러므로 보일러 제어를 효과적으로 하고자하면 이러한 상호간섭특성을 고려하여 공정별 대응 논리를 개발하고 제어로직으로 구체화하는 것이 필요하다. 최대한 간단히 표현하면 제어대상인 여러 공정 간의 영향 및 상호작용의 영향을 최소화시키는 것이 보일러 제어로직이 추구하는 목표라고 볼 수 있다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 보일러의 응답특성

발전소 출력을 증가 또는 감소시키고자 할 때 먼저 보일러 입력요소인 연료, 공기, 급수를 증감시킨다. 그러나 보일러의 연료공급과 연소반응에는 수십 초~수 분 정도의 시간이 필요하며, 이 시간지연 또는 시정수를 파악하는 것이 보일러 제어로직 설계와 구현의 선형요소라고 하겠다.



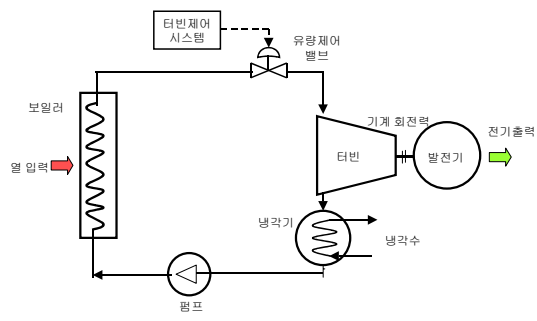
〈그림 1〉 보일러 응답의 시간지연

앞 그림1은 보일러의 출력을 감소시키는 상황에서 취득한 그래프이며, 빠른 기울기로 감소하는 곡선은 출력요구신호(ULD Set Point, Boiler Master Demand)이고, 후행하여 서서히 감소하는 곡선은 실제 증기압력

(Main Steam Pressure)와 증기유량(Total Steam Flow) 등이다. 발전소 운전원이 요구하는 출력 값에 즉시 도달하지 못하고 어느정도 시간이 지난 후에 실제 보일러의 출력 감소되기 시작하는 것이다. 출력을 증가시킬 때에도 시간지연이 존재한다.

##### 2.2 증기압력과 발전소 출력 관계

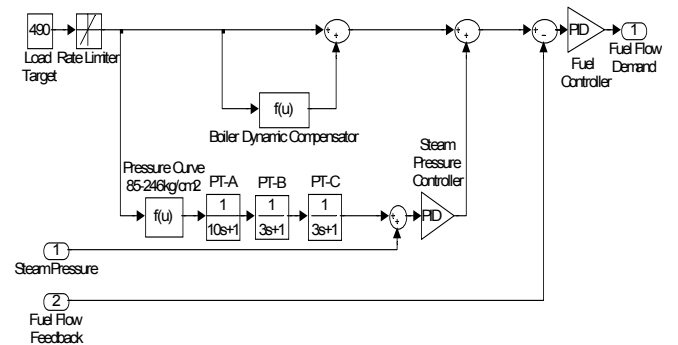
증기압력은 보일러가 낼 수 실시간 에너지 출력의 대표변수라고 할 수 있다. 보일러 출구에서 나오는 증기는 터빈으로 흘러들어가 증기의 열역학적 에너지가 기계적 회전에너지로 변환되고, 발전기에서는 기계적 에너지가 전기에너지로 변환된다. 증기가 보유한 열역학적 에너지를 엔탈피(Enthalpy)라고 하며, 증기온도와 압력에 의해 결정된다. 터빈이 발생하는 기계적 출력 Power, P는 다음 식으로 표시할 수 있다.  
 $P = k \cdot m \cdot (h1-h2)$  여기서, k는 터빈효율, m은 증기유량, h1, h2는 각각 터빈입구와 출구의 증기의 엔탈피를 나타낸다. 또한, 터빈밸브 개도가 일정한 경우 증기의 유량은 증기압력에 직선적으로 비례하므로 보일러 출구의 증기압력은 발전소가 보유하는 에너지를 실시간으로 대표하는 운전변수라고 할 수 있다. 그러므로 증기압력 제어가 안정적으로 이루어지도록 하는 것이 발전소 출력제어의 선결조건이라고 할 수 있다.



〈그림 2〉 화력발전소 에너지 매체의 순환

##### 2.2.1 증기압력 제어알고리즘

보일러 증기압력에너지의 원천은 연료(석탄)의 연소반응열로부터 나온다. 보일러 연료투입량이 증가(또는 감소)하더라도 증기압력에너지로 변환되기까지는 수 십초 이상의 시간이 필요한 한 것이다. 아래 그림3은 증기압력제어에 보일러 시간지연 특성이 반영된 제어로직이다.



〈그림 3〉 보일러 증기압력과 연료제어

그림 3의 중간 부분의 증기압력설정값(Steam Pressure Set Point)을 결정하는 기능을 보면 1차 시간지연 요소 3개를 직렬로 사용하고 있다. 이 3개의 시간지연 요소가 보일러 증기압력 시정수를 보정하기 위한 것이며, 이 지연요소를 생략할 경우 보일러 증기압력 형성능력이 반영되지 않은 상태에서 제어기가 작용하게 되는 결과로서 불안정 현상이 크게 발생하게 된다.

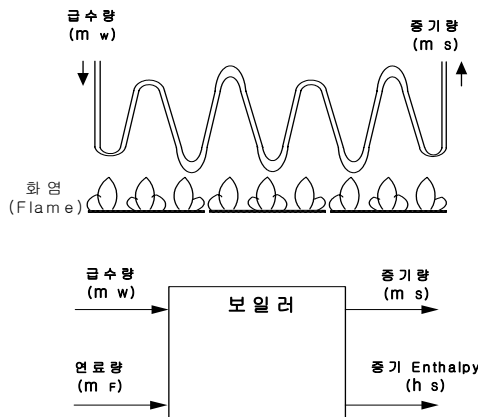
### 2.3 연료량과 급수량 관계

보일러 모델을 수식으로 만들 때 적용할 수 있는 근본법칙은 다음과 같이 생각할 수 있다. 보일러에 들어가는 급수량과 이 급수가 증기로 변환되어 나오는 양은 서로 같다(질량보존의 법칙). 급수의 증발량은 보일러의 연료공급량이 아닌 급수유량에 의해 결정되는 것이다. 예를 들어, 연료량을 일정히 유지하고 없이 급수량만 증가시키는 경우 증기량은 급수량에 따라 늘어나게 되고, 이 때, 연료 투입량 즉, 입력 열에너지의 증가가 없는 경우에 증기온도는 강하하게 된다. 보일러 입력 에너지가 일정한 가운데 증기량이 증가하면 단위 질량 당 증기에너지(엔탈피)는 감소하게 된다(에너지보존 법칙). 급수량이 감소하는 경우 반대의 현상이 일어난다.

이 두 법칙을 적용하면 간단한 수식의 보일러 모델을 다음과 같이 만들 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{급수량(mw)[kg/분]} &= \text{증기량(ms)[kg/분]} \\ \text{입력에너지(연료량,mf)} &= \text{증기량} \times \text{증기 엔탈피} \end{aligned}$$

그러나 이 모델은 보일러 안정상태에서만 제한적으로 적용할 수 있다. 실제 운전상황에서는 보일러 출력변동이 계속되는 경우가 많으므로, 앞의 간단한 모델에 더하여 보일러 동특성과 변수들 상호간섭을 반영하여 복잡한 모델을 만들어야 한다.



<그림 4> 간단한 보일러 모델

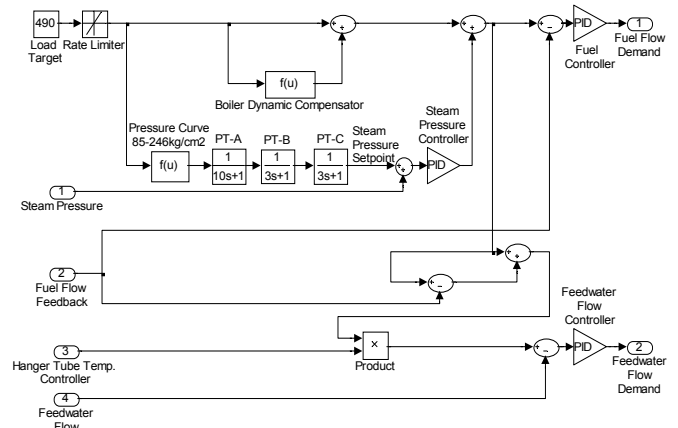
#### 2.3.1 증기온도와 관계

급수량을 일정히 유지하고 연료투입량을 변화시키면 보일러 증발관 내에서의 증발점이 변하고, 이에 따라 과열증기 구간의 변화에 따른 증기온도 변화로 이어진다. 급수량이 일정한 가운데 연료량만 증가하면 증기온도는 상승한다. 이 때 온도증가에 따라 증기 비체적도 조금 증가하므로 증기압력도 상승한다고 볼 수 있지만 그 영향이 적어 고려하지 않아도 문제되지 않을 것이다. 증기온도 제어의 기본원리는 연료량과 급수량의 균형을 맞추어 주는 것이다. 즉, 연료량/급수량 비율제어가 보일러 출구증기 온도제어의 바탕을 제공한다고 볼 수 있다. 다음 그림 6은 1차 과열기(Hanger Tube) 온도제어에 급수량 제어가 연계되어 있는 실제 로직을 보여주고 있다.

그러나 연료량/급수량 제어를 통한 증기온도제어에는 상당한 시간지연이 소요되므로, 다음 그림과 같이 과열기 온도제어에 급수(증기온도 냉각용)를 분사하는 방법을 증기온도제어에 같이 사용한다.



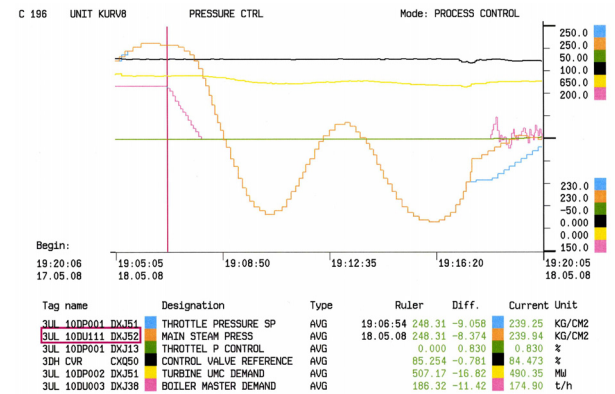
<그림 5> 급수분사에 의한 과열기 온도제어



<그림 6> 온도제어에 급수량 제어가 포함된 로직

#### 2.3.2 과열기 급수 분사량에 의한 증기압력 변동

다음 그림 7은 과열기 온도에 사용된 급수분사량 변동에 의한 증기압력 변동의 상황을 보이고 있다. 여기서 보일러 마스터 요구 값(Boiler Master Demand, 분홍색 그래프) 일정한 구간은 운전원 수동운전 상태이며, 연료량과 급수량이 일정하게 유지된다. 그럼에도 불구하고 증기압력이 흔들리게 하는 원인은 과열기 분사용 급수량 변동에 의한 것임을 다른 자료에서 확인할 수 있었다. 여기서 알 수 있는 것은, 보일러 증기의 출구 측에 위치한 과열기에 분사되는 급수량도 보일러 총 급수량의 일부로써 증기압력 미치는 영향이 다른 급수와 같다는 것이다. 또한 증기온도제어 측면에서 보면, 보일러 과열기 전단이 증발관에 흐르는 급수량이 연료와 균형을 이루게 하는 것이 온도제어의 근간이며, 과열기 분사는 단시간에 변동하는 온도를 제어하는 기능을 담당해야 함을 추론할 수 있다.



<그림 7> 과열기 급수 분사량에 의한 증기압력 변동

## 3. 결 론

지금까지 국내 표준화력 관류형 보일러 제어에 사용되고 있는 핵심 제어로직에 대한 분석내용을 기술하였다. 주요 운전변수인 보일러 출력(MW), 증기압력, 증기온도를 원하는 목표치로 제어하기 위해서는 보일러의 응답특성을 반영하여 제어로직을 구현됨을 알 수 있었다. 또한 보일러 연료량과 급수량의 균형을 유지하는 것이 증기온도와 증기압력 제어의 관건임을 확인하였다. 우리 연구과제의 목표인 '선진제어시스템 개발 및 발전소 적용'을 차질 없이 달성하기 위해서는 이 논문 주제에 대하여 연구 활동을 계속 할 것이다. 향후, 실제 보일러에 더 가까운 모델을 구현하고 이 모델을 제어로직과 결합하여 시뮬레이션을 하고자 하며, 그 결과를 다음에 소개하고자 한다. 끝.

### [참 고 문 헌]

- [1] 태안화력발전소 1,2호기 운전지침서, 1996
- [2] 태안화력발전소 1~4호기 운전 및 제어해설서, 2005