'90 韓國自動制御學術會議論文集 1990. 10.26~27

# 신호 흐름도 모델을 이용한 드럼형 보일러 시뮬레이터의 개발에 관한 연구

김 재 선 황 동 환 김 병 국 변 증 남
한국 과학 기술원 전기 및 전자 공학과

# A Study on the Development of Drum-type Boiler Simulator Using the Signal-Flow Diagram Model

JAE-SUN KIM D.-H.HWANG B.K.KIM Z.BIEN
Dept. of Electrical Engineering, KAIST

ABSTRACT

Because of being operated to accomodate the load variation, fossile power plants need modern controller to satisfy frequency regulation, fast response and efficiency requirement. But in the way of developing the Digital Instumentation and Control System that can adopt advanced control algorithms, power plant simulator must be available for safe and convenient test.

In this paper, a simple drum-type boiler model is proposed, using Signal Flow Diagram that describes the system by a collection of basic time response representing the relationship between process variables. After verifying the model and thereafter building simulator based on the proposed model, we test the operation of controller and aprove stability or efficiency of implemented control algorithms.

## 1. 서론

최근 전력 수요의 고정적 기저부하를 원자력이 담당하면서, 화력 발전은 점차 수요 변화에 의한 변동 부하를 추종하도록 운전되고 있다. 따라서 원자력 발전은 출력을 안정적으로 유지하는 것이 중요하고 , 화력 발전은 부하변화에 기민하게 대응하여 계통 주파수를 유지하고 운전 상태의 잦은 변화에 따른 효율 감소를 극복할수 있는 제어가 이루어져야 한다[1].

발전 제어는 높은 안정성이 요구되기 때문에 제어 설비의 변화에 상당히 보수적이며, 화력 발전소는 아직 기존의 아날로그식 제어를 그대로 사용하는 경우가 많다. 따라서 속응성 및 효율성을 만족시키기 어렵고 제어 기능에 비해 설치 공간이 크고 운전, 유지가 어려우며 발전소의 전체적인 상태 파악이나 자료의 수집, 정리가 체계적으로 이루어지기 어렵다.

따라서 기존의 단점을 극복하고 새로운 제어 구조 및 방식을 수용할수 있는 디지탈 계장제어 시스템의 개발 및 설치가 활발히 이루어지고 있어 신뢰성이 높은 본산 제어 시스템(Distributed Control System ;DCS)의 연구 개발이 진행되고 있다[2]. 한편 디지탈 제어기를 개발하는 과정에서 발전소에 직접 연결하여 성능을 시험한다는 것은 기간 산업체의 안정성과 경제적 이유때문에 현실적으로 불가능한 경우가 많으므로 발전소를 모사해서, 그 등가적 기능을 수행할 수 있는 시뮬레이터의 제작이 제어기 개발의 필수적 선결 요건이다. 제어용 디지탈 시스템 개발에 사용되는 일반적인 시뮬레이터 목적을 요약하면 다음과 같다.

- o 제어기 개발과 개선
- o 제어기와 플랜트와의 인터페이스 통합 실험
- o 제어 구조 및 알고리즘의 비교 검증
- o 개략적인 제어 변수 조정[2]

위와 같은 목적을 위한 시뮬레이터는 제어기에서 필요로하는 모든 공정 변수를 제공하고, 동특성을 잘 모사해야하며 시뮬레이션 허용 시간을 만족하여 실시간에 계산이 가능해야 하므로 허용되는 정확도를 가지고, 보일러 자동 제어 범위 안에서 실용적인 모델을 개발해야 한다. 특히 제어기 측면에서 보았을때 전체 플랜트와 같은 동작을 할 수 있어야 하므로, 보일러 뿐만 아니라 구동기와 센서까지도 포함된 모델이어야 한다. 그러므로 모델은 이들의 동특성까지 함께 구현해야하며[3] 제어기와 연결된 시뮬레이터 전체 시스템은 그림 1 과 같다.

제어기를 설계하기 위해 지금까지 여러 종류의 보일러에 대해 여러가지 방식으로 모델을 구하려는 노력이 진행되어 왔다. 그런데 모델을 얻는 과정에서는 여러가지 방법을 동시에 이용하게 되며 건설된 보일러의 시공 자료, 재료 특성, 여러 동작점에서의 공정변수들의 정상 상태 값과 입력이나 외란의 변화에 대한 동특성(Dynamics) 등이 필요하다. 또 이런 자료의 유무에 따라 모델링의 방법도 크게 영향을 받게 된다. 기존의 모델링 방식에 대해 살펴보면, 첫째 수학적 모델링은 보일러의 각 부분에 열역학 법칙을 적용하고,얻어진 각 식들을 종합하는 방식으로 비선형 고차 편미분 방정식 모델이 얻어지며 여러가지 현실적 가정하에 제어 대상이 되는 몇가지 변수만으로 상태 변수를 제한시켜 저차 방정식으로 간략화한다[4]. 이 방법의 정확도는 방정식을 세울때의 가정에따라 얼마든지 변할수 있으며 보일러 설계를 통한 축적된 오랜 경험과 기술, 자료등 기반 기술이 있어야 가능하다. 두번째로 계수 추정 모델링은 보일러를 다수의 입력과 다수의 출력이 존재하는 집중 시스템으로 간주하여 입출력 변수를 정의하고, 모델의 구조를 정하고[5] 미지의 매개변수를 입출력 자료를 이용하여 최소 자승법, 확장 칼만필터법(Extended Kalman Filter; EKF)[6] 등을 사용하여 추정해내는 방법이다. 이 방법은 보일러의 전체적 동특성 경향을 이

해하기 쉽고 수학적 모델링보다 간편하지만, 전체 보일러 시스템의 구조를 결정하기 어렵다.

또 다른 방법으로 관심의 대상이 되는 공정 변수와 시스템 입력 사이의 관계를 여러가지 실험을 통해 파악하고, 얻어진 자료로 실험식을 구하는 방법이다[7]. 장점으로는 실험으로 입증되어 있으므로 비교적 안정된 특성을 보이지만, 대상 보일러가 달라질 때마다 실험을 다시 해야하며, 제어기 검증용으로 사용하기 위해서 필요한 많은 공정 변수를 실험식에 고려하기 어렵다.

앞에서의 수학적 모델링은 대상 발전소가 외국의 기술로 건설된 경우에는 시공자료, 사용된 재료특성, 시운전 자료등을 입수하기 어렵고 많은 모델 개발 시간이 필요하다. 두번째 계수 추정 모델링은 작은 시간 간격으로 측정되어 기록된 입출력 데이타가 필수요건인데, 데이타 수집, 기록, 처리가 체계적으로 이루어지는 발전소의 경우가 아니면 적용하기 어렵다. 마지막 실험식 모델링은 비용이 많이들고 실험에 의한 보일러의 안전성을 보장하기 어렵다. 그러므로 현실적인 국내 여건과 이용할수 있는 한정된 자료만으로 모델을 얻을수 있는 대안이 필요하다.

보일러의 각 제어루프는 플랜트 동특성의 일부분만을 제어하므로 플랜트의 여러 동특성을 분리하여 생각할 수 있다. 공정 플랜트를 표현하는데 많이 이용되는 신호 흐름도(Signal Flow Diagram)[8] 에서는 동특성의 중요 변수 사이의 상관관계가 간단한 몇가지 시간 특성으로 표현되는데, 전체 보일러를 개개의 동특성을 표현한 신호 흐름도의 결합으로 재구성하면 보일러 전체의 동특성이 알기 쉽게 표현되고, 변수 상호간의 연관과 제어기에서 중요한 요소로 작용하는 변수를 한 눈에 알게 된다. 신호 흐름도의 많은 구성 블록의 시간 특성을 결정하기 위해서는 대상 보일러의 동특성 데이타, 발전소 건설 자료가 필수적이지만 비슷한 규모의 타 발전소 자료와 열역학적 데이타를 이용할 수 있으리라 생각된다.

이 논문에서는 먼저 현재의 여건하에서 모델 계수의 도출이 가능하고 쉽게 이해할 수 있으며 개발 기간이 짧은 모델링 방법으로서 이 신호 흐름도 의 개념을 소개하고, 자연순환식 드럼형 보일러인 서울 화력 4호기를 대상으로하여 드럼형 보일러의 일반적 형태를 유지하며 자동제어 범위에서 보일러를 모사할 수 있는 모델을 제안하고 현장의 제어기를 파악하여 연결 실험하여 모델을 검증한 후 결과를 검토하기로 한다.

## 2. 신호 흐름도를 이용한 보일러 모델링

### 2.1. 신호 흐름도의 개념

직류모터의 특성이 선형 시불변성이 만족된다는 가정하에서 관심의 대상인 물리량(전류, 전압, 토크, 각도 등) 사이의 관계를 미분으로 나타내고 라플라스 변환을 적용하여 전달 함수로 표현하면 그림 2와 같은 블록선도를 얻을수 있다[9]. 블록선도를 살펴보면 1/(As+B), K , 1/S 세가지 형태의 전달함수의 결합으로 구성되었으며 이들의 단위 계단함수 입력에 대한 각각 1차 지연요소,계단함수, 그리고 램프함수이다. 전달함수와 단위계단 응답을 대응시켜 그림 2의 구성요소인 전달함수를 대체하면 그림 3과 같다.

시간 영역에서의 표현에 익숙해 있으므로 그림 3으로부터 직류 모터의 여러 변수 사이의 관계를 쉽게 연상할 수 있다. 이렇게 시간응답 특성을 연결하여 시스템을 표현한 그림을 신호 흐름도라고 하며 화학 공정 시스템에서 많이 사용되며 보일러 동특성을 표현하는데에도 이용되고 있다[15]. 이 신호 흐름도에서는 전기적 시정수, 기계적 시정수 그리고 토크 상수와 역기전력 상수를 알수 있다.

방정식과 전달함수에 의한 표현은 시스템의 해석에 편리하여 이미 개발된 해석 방법을 사용, 시스템의 안정성 및 특성을 분석하기 쉽지만 시스템 전체를 쉽게 이해할 수 없는 단점이 있다. 한편 그림이나 블록 선도, 그리고 신호 흐름도 등과 같은 방식은 전체를 알기 쉽지만 시스템의 성질을 직접 해석적으로 이끌어 내기 어렵다. 알고 있는 시스템을 해석적으로 표현하는 것과는 달리 시스템 전체를, 목적에 따라 여러가지 편리한 가정을 하여 종합적으로 표현하는 방식이 모델링과정에서는 유리하다.

이와같이 전달함수를 얻는 과정을 거치지 않고 직접 시간 응답을 연결하여 모델링하고 실험이나 알려진 대표적 값(Nominal value)에서 이득이나 시정수를 찾을 수 있을 것이다. 그러므로 자료의 미비와 모델 개발 기간의 제한아래, 제어기 검증이라는 목적을 위하여 클레펜츠의 보일러 모델에서 사용된 이런 방법을 택하여 보일러를 모델링하고자 한다.

### 2.2. 드럼형 보일러 모델링

보일러 모델링 및 제어는, 보일러 형태에 따라 결정되는데 자연 순환식 드럼형 보일러와 잘 알려진 그 물리적 특성을 이용하여 신호 흐름도로 표현되는 모델을 구해보자. 그런데 보일러 제어는 각각의 제어 대상 동특성이 있으므로 보일러 전체를 한꺼번에 다루기 보다는 제어기를 기준으로 여러개의 등가적 시스템으로 모델링하고, 뒤에 전체를 종합하는 방법을 택하기로 한다. 그리고 시뮬레이션 시간을 고려하여 가능한 큰 영향을 미치지 않는 동특성은 무시하고 비선형 특성을 선형화 시켰다.

#### 2.2.1 압력 동특성(Pressure Dynamics) 모델링

압력 제어의 관점에서 본 보일러의 등가적 모델은 그림 4와 같다. 보일러가 잘 제어되고 있을때, 드럼 수위는 비교적 일정하게 유지되고, 공기량도 알맞게 보일러로 공급된다. 또한 절탄기에서의 급수의 온도 변화에 의한 증발량의 변화도 무시할 수 있다. 그러므로 주증기 압력은 연료량에 의해 결정된다고 볼 수 있다. 그림 4는 증발기, 드럼, 여러개의 과열기를 하나로 생각한 집중과열기 (Lumped SH), 그리

고 터빈 조절 밸브로 구성되어 있다. 드럼 내부 압력, 주증기 압력 및 드로틀 압력(Throttle Pressure)에 관한 신호 흐름도를 구성하면 그림 5 와 같다.

블록 1은 연료 유입율과 증발기에 전달되는 열전달율과의 관계를 나타낸다. 보일러 주증기 압력에 대한 일반적 특성을 나타낸 그림 6(a)에서의 유효 지연시간(Td)을 나타내며, 일반적으로 발전소의 연료 종류 및 연소 형태에 따라 이미 실험적으로 정해진 값을 사용한다.증발기 열량 변화에 의한 발생 증기량의 변화를 블록 2에서 나타내었다. 블록 3는 발생된 증기와 터빈에서 사용되는 증기의 차이에 의해 드럼 내부 압력이 점차 적분특성으로 변화하는 것을 표현하고 있다. 블록 4는 증기의 수급차에 의한 변화외에 부하에 따른 보일러 동작점의 이동으로 인한 드럼압력 변화를 나타낸다. 현대의 모든 터빈은 강제 유입(Forced - Withdrawal) 방식이고 발전소 제어방식이 보일러 추종 방식이므로 제어가 이루어지고 있는 경우에, 출력 신호에 따라 주증기량은 거의 결정된다고 볼 수 있다. 블록 5는 이런 선형성과 증기가 집중 과열기를 통과하는 시간 지연을 표현하는 것이다. 블록 6은 주증기량에 따라 드럼에서 과열기 출구까지의 집중 과열기 내부의 압력 감소를 나타내며, 여러가지 부하조건에서의 두 압력차와 주증기량에서 1차의 선형 관계를 찾아 근사하였다. 그림 6(b)에서 알수있듯이 주 증기량의 변화는 압력에 대한 외란으로 작용해서 급격한 압력변화를 가져오며 블록 6이 이런 현상을 표현하게된다.주증기압력 변화는 드로틀 압력에도 영향을 미치지만, 조속기의 작용으로 다시 일정 시간 후에는 정상 압력을 유지하게 된다. 그러므로 이런 조속기의 특성을 임펄스 응답으로 블록 7에서 근사하였다.

### 2.2.2. 수위 동특성(Drum Level Dynamics)모델링

수위제어에 관한 등가적 보일러는 그림 7과 같다. 급수는 급수 펌프(Boiler Feed Pump,BFP)의해 절탄기에서 예열되어 드럼으로 공급되는데 드럼 내부는 급수와 증기가 섞여 있으면서 증기가 큰 부피를 차지하고 있는데 급수의 온도는 이보다 낮다. 그러므로 급수율이 증가하는 초기에는 드럼내의 증기 방울이 응축되고 이때문에 일시적인 수위 저하 현상을 보이고 일정시간 뒤에 수위는 비로소 급수에 비례하는 증가를 보인다. 마찬가지로 연료량의 증가는 증기 발생을 증가시켜 일시적으로는 증기 방울의 부피가 커져 수위가 상승하고 점차 증발량증가에 의한 수위 감소가 나타나게 된다. 또 부하의 증가에 따라 터어빈에서 사용하는 증기량이 증가하면 수위는 감소한다. 또 부하가 변화하면 드럼 내부 압력이 변화하여 증기 기화에 영향을 주어 드럼 수위가 조금 변화하였다가 점차로 부하변화에 반비례하게 된다. 이런 드럼 수위 변화의 특이한 현상을 'Shrink and Swell' 현상이라고 하며 그림 8에서 나타내었다[6][8].

등가적 모델과 이런 수위의 물리적 현상을 이용하여 신호 흐름도를 구하면 그림 9와 같다. 블록 1은 증발기 열량 증가에 따른 증기 발생으로 상쇄되는 급수율을 표현한다. 블록 2는 연료율와 급수율의 불균형에서 나타나는 드럼에 유입되는 순수 급수량을 나타내는 적분블록이다. 이 드럼에 유입된 급수율과 주증기에 의한 급수 감소율과의 차이가 블록 4에서 적분되면 드럼 수위가 된다. 그러나 드럼 수위의 독특한 현상을 표현하기 위해 나머지 블록들이 필요하다. 블록 5는 급수가 증발기로 내려가는 시간 지연을 표현하고, 증발기에서의 증발율에 미치는 열량과 급수의 영향을 블록 6과 7에서 상대적 비율로 표현하였다. 이 증발율이 드럼으로 들어가는 급수 증가에 미치는 영향을 블록 8에서 표현했다. 블록 2의 적분되는 양보다 블록 8에 의한 영향이 빨리 나타나므로 초기에는 특이 현상을 보이다가 블록 8의 영향이 정상상태를 유지하고 적분되는 양이 커지기 시작하면서 점차 입력과 출력이 정상 관계를 나타낸다. 마찬가지로 블록 10도 주증기의 변화에 의한 드럼 수위의 순간적인 특이 현상을 표현한다.

## 3. 검증 실험 및 검토

앞장에서 제안된 보일러의 각 동특성별 신호 흐름도에서 결정해야 할 블록의 이득은, 많은 경우 변수와 제어 입력의 정상상태값을 이용 추정했다. 그리고 밖에서 관찰되지않는 내부 변수는 신호 흐름도를 만들어 가는 과정에서 통찰에 의하여 결정하였으며, 공정변수의 보편적 시간 특성에서 시정수를 추정하고 시뮬레이션으로 실제의 동특성과 접근시키며 조정하였다. 공정 변수의 목록, 변수 범위와 단위 그리고 50% 75% 100% 각각의 보일러 출력에서의 정상상태값을 표 1에서 보였다.

현장의 데이타가 일정한 관계를 찾기 어려울만큼 불규칙하고 기준값과 차이가 커서 기준이 모호해진 경우가 많기 때문에, 표 1의 설정값은 현장에서 기록된 값과 기준값을 참고하여 시뮬레이터 모델의 기준으로 정한 것으로, 시뮬레이터의 목적이 제어기 동작의 검증에 있으므로, 근사하는 수치와 시간 특성을 보이며 보일러가 가지는 전형적 물리 현상을 가지는 시뮬레이터 모델에 대해서 제어가 잘 이루어 진다면, 실제의 플랜트에 대해서는 제어 변수의 조정이 필요할 뿐이다. 그러므로 작은 오차뿐이라면 가능한한 선형화하여 모델링이 편리하도록 하였고, 선형화 오차를 허용할수 없다면 2차의 비선형 함수로 보간하여 사용하였다.

계수를 추정한후 컴퓨터로 계산하기 위해 각 블록을 ZOH(Zero-Order-Hold) 등가의 이산 시스템으로 변환하고[11] 변수가 변화해 나가는 신호 흐름도에서의 순서대로 계산을 수행하였다. 그 과정을 정리하면 다음과 같다.

i) 모델 자체실험

정해진 각 신호 흐름도 모델에 보일러의 가장 중요한 입력인 연료 유량, 급수량, 그리고 출력 신호에 따른 주증기량을, 초기 상태인 75% 부하에서의 값에서 100% 또는 50%에서의 값으로 증가 또는 감소시켜 실제로 보일러가 보이는 경향과 비교하여 물리적 당위성을 만족하는지 확인한다.

ii) 제어기 시뮬레이션

실제로 동작하고 있는 제어기를 파악해서 프로그램으로 구현하고, 센서와 구동기까지 포함한 모델과 연결 실험한다. 드럼 보일러에서 제어되어야 할 중요한 대상은 크게 4가지로 요약될 수 있는데 각각 주증기 압력 및 공기 제어기,노내압 제어기,증기 온도 제어기,수위 제어기가 이들을 제어한다 [8].

iii) 제어기 검증

검증하고자 하는 DCS 제어기와 실시간 실험을 수행한다. 본 실험에서는 대표적으로 압력과 수위에 대해서 제시한다.

A. 압력

서울 4호기는 중유전소식 평형통풍로로서[10] 발전소 부하신호의 최대변화율은 1 분에 최대 부하 137.5 MW 의 4% 이므로 이를따라 부하를 변화시켜 본다. 이와같은 방법으로 여러가지 부하변화에 대한 주요 압력 변수의 정상상태에서의 값을 표 2 에서 보였다.여기에서 기준 동작점 75%에서 부하를 100%로 증가시키거나 50%로 감소시키며 정상상태에 이르렀을 때 기준 설정값과의 오차의 절대값은 대략 5% 이내의 범위안에 들고 있다.

B. 수위

대상 보일러에 대해 이루어진 수위에 관한 동특성 조사 자료를 입수할 수 없었으므로 동형의 Bell/Astrom 160 MW 보일러의 수위에 관한 실험식[7]을 기준으로 삼아 모델 계수를 추정, 실험하였다. 정상상태에서 기준 수위 0 포인트를 유지함을 그림 10에서 알수 있다.

프로그램으로 모사된 제어기와의 통합 실험에서 모든 공정 변수가 50% - 100% 부하에서 기준 설정값과 5% 이내의 오차로 일치하고 있음을 보았다. 그러나 최종적인 DCS 제어기와의 통합 실험은 이보다는 큰 오차를 가지는데, 이는 제어기와 시뮬레이터 사이에서 신호가 교환될때 A/D, D/A 변환 오차, 신호의 감쇄 및 잡음으로 이상적인 시뮬레이션 환경과는 다르기 때문으로 생각된다. 그러므로 절대 수치의 전반적 편차를 가져오게 되었다. 또다른 주요 오차원인은 현장의 공학제어를 파악하는 과정에서 비선형 제어의 특성을 완전히 알아낼수 없어 많은 부분에서 가정이 이루어 졌기때문이다. 끝으로 정상상태에 도달하는 시간에 관계되는 시정수도 동특성 자료의 부족으로 기준이 될 그래프가 없으므로 오버 슈트가 일어나지 않도록 조정하였기 때문에, 실제의 시간특성과 완전히 일치한다고 말할수 없지만, 공정 변수나 제어 입력이 안정되고 동시에 최대 부하 신호 변화에서도 시간 지연이 작으므로 비교적 정확한 시정수의 선택으로 볼수 있다.

### 3.2.시뮬레이터 하드웨어 시스템

시뮬레이터는 플랜트의 특성을 쉽고도 다양하게 변경할 수 있도록 컴퓨터를 이용하는 것이 일반적으로, 모델의 수정 보완에 유연하게 대처할 수 있다. 제작된 시뮬레이터는 마이크로프로세서를 이용한 간단한 컴퓨터 보드를 이용하였고, 모든 플랜트가 소프트웨어로 구현되며, 공정변수를 외부에서 알기 쉽도록 표시하는 간단한 기록계나 지시계를 장치하였다. 제작된 시뮬레이터의 구성도는 그림 11 과 같다.

## 4. 결론

지금까지 대단위 공정 설계 및 제어 부문은 대부분 외국의 기술에 의존하였다. 그래서 제어기의 개발이 많이 이루어지고 있지만, 시스템 제어는 대상 플랜트의 특성을 면밀히 연구하지 않고는 불가능하다. 그러므로 발전소 제어용 디지탈 시스템의 개발과 이를 검증할수 있는 시뮬레이션 시스템의 개발이 병행되어야 한다.

이 논문에서는 클래펜츠의 신호 흐름도 기법을 이용하여, 현장의 제어기에서 필요한 공정 변수를 모두 제공하는 드럼형 보일러의 모델을 제안하였다. 그리고 제어기를 해석하여 모델과 연결, 시뮬레이션을 수행하여 모델의 기능을 평가하고, 이를 최종적으로 제작된 디지탈 제어시스템과 연결하여 제어기의 동작을 검증하였다. 그리하여 제안된 모델이, 비교적 선형성이 만족되는 자동 제어 범위 안에서, 받아들일 수 있는 오차범위를 가지고 보일러를 충분히 모사하는 것을 확인하였다. 실제로 운용되는 제어기, 센서 및 구동기를 보다 완벽하게 파악한다면, 현장의 공정값에 더욱 근접시킬 수 있을 것이다.

모델이 비록 서울화력 4호기라는 구체적 보일러를 대상으로 하였지만 발전소 보일러는, 종류가 같다면 용량의 차이만 있을뿐 기본적 구조는 거의 유사하므로 다른 보일러에도 쉽게 적용될 수 있을 것이다. 따라서 이 형태가 개발하려는 다중 루프 제어기의 검증에는 가장 적당한 형태이고, 모델링 기간을 최소화 할 수 있으리라 생각된다.

제작된 시뮬레이터는 많은 제약을 안고 있고, 특히 모델이 모사할수 있는 범위가 보일러 자동제어 범위로 한정된다는 가장 큰 단점을 가지고 있다. 그러나 사용자와 시뮬레이터 사이의 인터페이스를 개선해서 On-Line으로 모델을 파악하고 변경시킬 수 있다면 보다 나은 시뮬레이션 환경을 제공할수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌


[1] 남 해 곤, "전력 플랜트 모델링", 전기학회지, 제 38권, 제 3호, 1989

[2] 한국 전력 공사 기술 연구원, "발전소 제어용 디지탈 계장 제어 시스템 개발(중간 보고서)", 1989

[3] 황 동 환, "FTCS의 성능 시험을 위한 보일러 제어 시스템 시뮬레이터의 개발에 관한 연구", 전기학회 논문지, 제 37 권, 제 11호, 1988

[4] 이 재 용, "관류형 보일러의 비선형 저차 모델 개발에 관한 연구", 한국 과학 기술원, 핵 공학과, 1986

[5] 한국 전자기술 연구소, "공정정보 처리 시스템 개발에 관한 연구", 1985

[6] A. Tysso, "Modelling and Parameter Estimation of a Ship Boiler", Automatica, Vol.17, No.1, pp.157-166, 1981

[7] R.B.Bell, K.J.Astrom, "Dynamic models for boiler-turbine-alternators units : data logs and

parameter estimation for a 160 MW unit", Report TFRT-3192, Lund Institute of Technology, Sweden, 1987

[8] Gunter Klefenz, "Automatic Control of Steam Power Plants", Hartmann & Braun AG, Minden, Bibliographisches Institut, Zurich, 1986

[9] Benjamin C. Kuo, "Automatic Control Systems", Prentice-Hall, 1982

[10] 한국 전력 공사 서울 화력 발전소, "서울 화력 4 호기 운전 조작 설명서", 1983

[11] K.J. Astrom & Bjorn Wittenmark, "Computer Controlled Systems", Prentice-Hall, 1984

[12] 한국 전력 공사 기술 연구원, "주파수 조정운전을 위한 터빈 조속기 및 보일러 제어계의 성능 개선", 1987.6

[13] 한국 전력 공사 기술 연구원, "마이크로 컴퓨터를 이용한 전자제어 시스템의 고신뢰화에 관한 연구", 1987.5

[14] 이 재 용, "관류형 보일러의 비선형 저차 모델 개발에 관한 연구", 전기 학회 논문지, 36권 1호, 1987.1

[15] F.G. Shinskey, " Process Control Systems", McGraw-Hill, 2ed, 1979

[16] Bailey Meter Company Data Book

[17] "Application of Control to Steam Boilers", C & I, Nov, 1983

[18] 남 해 곤, "Modelling and Control System Design Stydy of A Coal Fired Power Plant", Univ. of Texas Austin, 1986

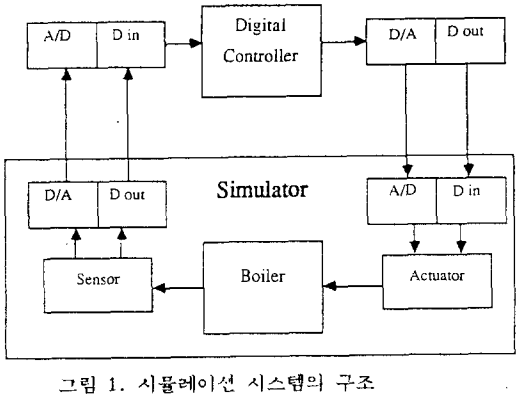



그림 1. 시뮬레이션 시스템의 구조

Fig.1. Simulation System Structure

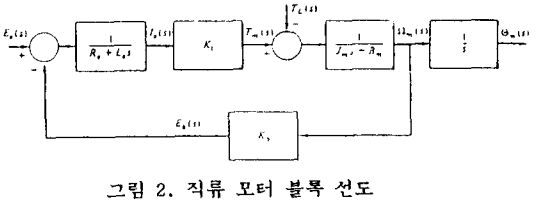


그림 2. 직류 모터 블록 선도

Fig.2. DC Motor Block Diagram

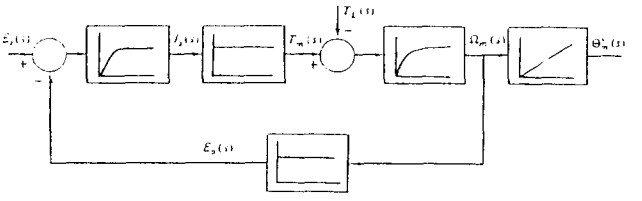


그림 3. 직류 모터의 신호 흐름도

Fig.3. DC Motor Signal Flow Diagram

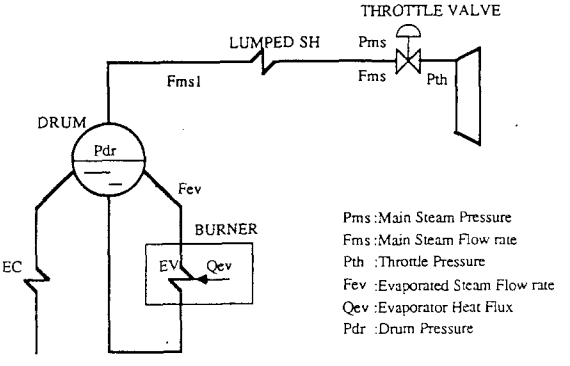



그림 4. 압력 동특성에 대한 등가적 보일러

Fig.4. Equivalent Boiler for Pressure Dynamics

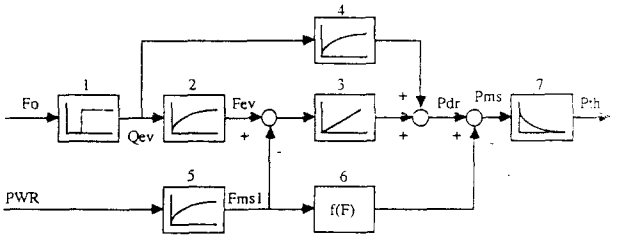



그림 5. 압력 동특성 신호 흐름도

Fig.5. Signal Flow Diagram for Pressure Dynamics

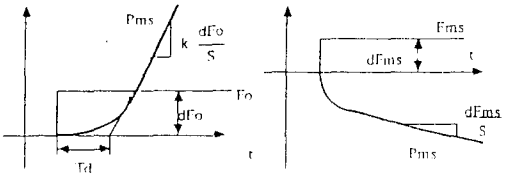



그림 6. 보일러 압력 특성[8]

Fig.6. Boiler Pressure Characteristics

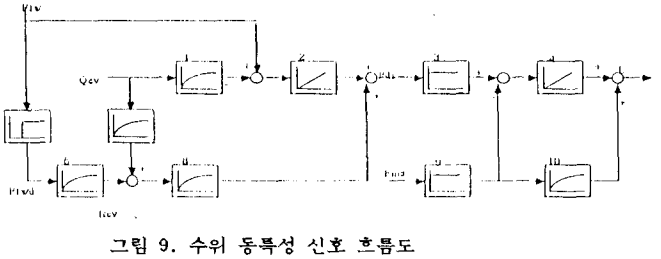


그림 9. 수위 동특성 신호 흐름도

Fig.9. Signal Flow Diagram for Level Dynamics

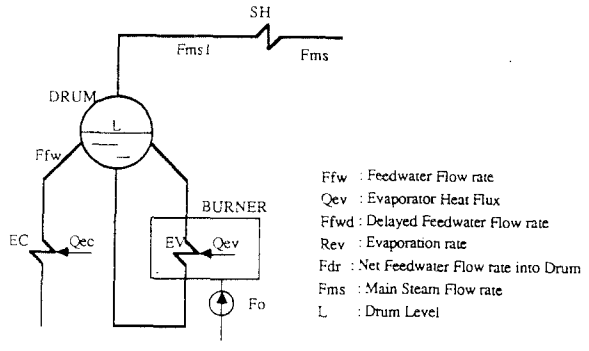
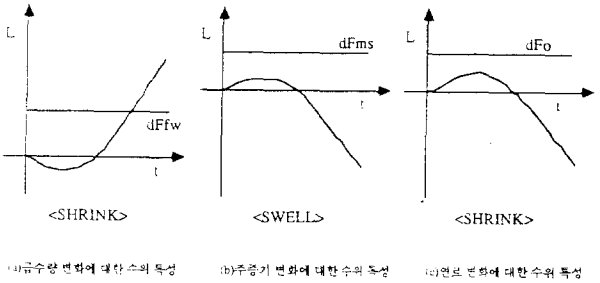



그림 7. 수위 동특성에 대한 등가적 보일러

Fig.7. Equivalent Boiler for Level Dynamics




(a)급수량 변화에 대한 수위 특성 (b)주증기 변화에 대한 수위 특성 (c)연료 변화에 대한 수위 특성

그림 8. Shrink & Swell 현상[8]

Fig.8. Shrink & Swell Phenomina

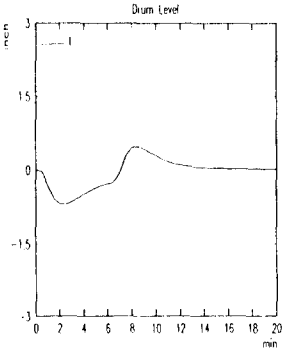



그림 11. 부하 증가시의 제어기와 연결된 수위 변화

Fig.11. Controlled Level Dynamics at Load Increase

| OP Point | 50 % | | | 75 % | | | 100 % | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PV | Ref. | Real | Err. | Ref. | Real | Err. | Ref. | Real | Err. |
| PWR( MW ) | 68.5 | 68.5 | 0 | 103 | 103 | 0 | 137.5 | 137.5 | 0 |
| Fms( T/H ) | 200 | 197 | 1.5 | 320 | 320 | 0 | 440 | 442 | 0.1 |
| Fo( KL/H ) | 15.4 | 15.1 | 2 | 22.7 | 22.7 | 0 | 30 | 30.6 | 2 |
| Pdr( Kg/cm2) | 128 | 128.1 | 0.1 | 132 | 132 | 0 | 136 | 135.4 | 0.5 |
| Psh( Kg/cm2 ) | 126.5 | 126.2 | 0.2 | 128 | 128 | 0 | 129.5 | 128.9 | 0.5 |
| Puh( Kg/cm2 ) | 126 | 126 | 0 | 126 | 126 | 0 | 126 | 126 | 0 |

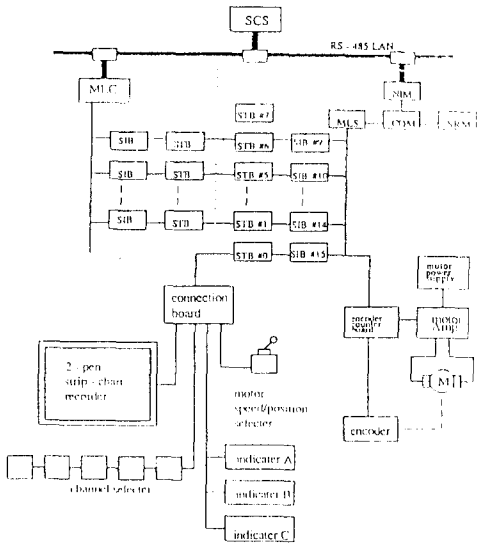



그림 12. 시뮬레이션 시스템 하드웨어 구성

Fig.12. Simulation Hardware System

| Process Value | brief | Range | Unit | Norm.Value Power(%) 50 | 75 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Power | MW | (0~137.5) | MW | 68.5 | 103.0 | 137.5 |
| Throttle Press | $P_{TH}$ | (50.0~150.0) | $Kg/cm^2$ | 126 | 126 | 126 |
| Main Steam Press | $P_{MS}$ | (0.0~150.0) | $Kg/cm^2$ | 126.5 | 128 | 129 |
| Burner Oil Press | $P_O$ | (0.0~15.0) | $Kg/cm^2$ | 14.7 | 14.8 | 14.9 |
| Furnace Draft Press | $P_{FD}$ | (-100.0~50.0) | $mmH_2O$ | -10 | -10 | -10 |
| Div. Wall S/H in Press | $P_{DI}$ | (50.0~200.0) | $Kg/cm^2$ | 127 | 131 | 133 |
| Drum Press | $P_{DR}$ | (0.0~210.0) | $Kg/cm^2$ | 128 | 132 | 136 |
| Feedwater Press | $P_{FW}$ | (50.0~200.0) | $Kg/cm^2$ | 140 | 140 | 140 |
| Total Feedwater flow | $F_{FW}$ | (0.0~500.0) | Ton/Hr. | 200 | 300 | 400 |
| Main Steam Flow | $F_{MS}$ | (0.0~500.0) | Ton/Hr. | 200 | 320 | 440 |
| Aux Steam flow | $F_{AS}$ | (0.0~40.0) | Ton/Hr. | 2.5 | 4.4 | 7 |
| Fuel Oil flow | $F_O$ | (0.0~40.0) | KL/Hr. | 15.4 | 22.7 | 30.0 |
| Air flow A | $F_{Aa}$ | (0.0~500.0) | Ton/Hr. | 228 | 330 | 420 |
| Air flow B | $F_{Ab}$ | (0.0~500.0) | Ton/Hr. | 228 | 330 | 420 |
| Exess Air Ratio | $O_2$ | (0.0~10.0) | % | 1.2 | 0.8 | 0.4 |
| Div. Wall S/H A in Temp | $T_{Dai}$ | (300.0~650.0) | °C | 420.0 | 420.0 | 420.0 |
| Div. Wall S/H B in Temp | $T_{Dbi}$ | (300.0~650.0) | °C | 420.0 | 420.0 | 420.0 |
| Div. Wall S/H A out Temp | $T_{Dao}$ | (350.0~650.0) | °C | 450.0 | 450.0 | 450.0 |
| Div. Wall S/H B out Temp | $T_{Dbo}$ | (350.0~650.0) | °C | 450.0 | 450.0 | 450.0 |
| Fin. S/H in Temp | $T_{Fi}$ | (350.0~650.0) | °C | 470.0 | 470.0 | 470.0 |
| Fin. S/H out Temp | $T_{Fo}$ | (350.0~650.0) | °C | 540.0 | 540.0 | 540.0 |
| R/H out Temp | $T_{RH}$ | (350.0~650.0) | °C | 540.0 | 540.0 | 540.0 |
| Feedwater Temp | $T_{FW}$ | (0.0~250.0) | °C | 240.0 | 240.0 | 240.0 |
| Drum Level | L | (-15.0~15.0) | inch | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Deaerator level | $L_{DE}$ | (0~100) | % | 50 | 50 | 50 |
| Hot-well level | $L_{HO}$ | (0~100) | % | 50 | 50 | 50 |

표 1. 각 동작점에서의 공정 변수 정상상태값

Tab.1. Process Variable Steady-State Value at various Operating Point

표 2. 압력 동특성 변수 정상상태값

Tab.2. Pressure Variable Steady-State Value