

신호 흐름도 모델을 이용한 화력 발전소 드럼형 보일러 시뮬레이터의 개발에 관한 연구

A Study on the Development of Drum-Type Boiler Simulator for Thermal Power Plant Using the Signal Flow Diagram Model

金 在 善* · 黃 東 煥** · 金 炳 國*** · 卞 增 男[§]
(Jae-Sun Kim · Dong-Hwan Hwang · Byung-Kook Kim · Zeungnam Bien)

요 약

현대에 들어와 화력발전이 점차 전력 수요 변화에 의한 변동 부하를 충족시키도록 운전되면서, 제어의 질이라 할 수 있는 주파수의 유지, 속응성 및 효율성의 개선이 더욱 필요하게 되어 발전된 현대 제어 이론을 적용하려는 노력이 진행되고 있고, 동시에 제어가 디지털 계장 제어 시스템으로 대체되고 있다. 그러나 개발된 제어 시스템의 운용 및 검증을 위한 직접적 실험이 현실적으로 불가능하므로 발전소를 모사해줄 시뮬레이터가 반드시 필요하다.

이 논문에서는 변수들 사이의 인과 관계를 기본적 단위 계단 함수 응답의 결합체로 표현하는 신호 흐름도를 드럼형 보일러에 적용하여, 자동 제어 범위안에서 사용될 수 있는 일반적 드럼형 보일러의 모델을 제안하고, 이를 이용 실제의 발전소 보일러를 모델링하여 현장에서 사용되는 제어기와 모델을 결합 검증하였다. 최종적으로 이렇게 검증된 모델을 이용하여 드럼형 보일러 시뮬레이터를 제작하여 궁극적 목적인 제어 시스템의 동작 검증과 구현된 제어 구조의 안정성, 효율성을 시험하는데 이용될 수 있도록 하였다.

Abstract- Owing to the need to accommodate the load variation, thermal power plants need a modern controller in order to achieve better frequency regulation, faster response and higher efficiency. For a successful development of the digital instrumentation 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 combination of basic time responses representing the relationships between cause and effect process variables. After verifying the model and thereafter building a simulator based on the proposed model, we tested the operation of the controller and stability or efficiency of the implemented control algorithms.

1. 서 론

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

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

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

- 제어기 개발과 개선
- 제어기와 플랜트와의 인터페이스 통합 실험
- 제어 구조 및 알고리즘의 비교 검증
- 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 가능해야하므로 허용되는

정확도를 가지고, 보일러 자동 제어 범위 안에서 실용적인 모델을 개발해야 한다. 특히 제어기 측면에서 보았을때 전체 플랜트의 동가적 동작을 할 수 있어야 하므로, 보일러 뿐만 아니라 동공기와 센서, 현장의 아날로그 신호를 모사할 A/D, D/A 변환기까지도 포함된 모델이어야 한다. 그러므로 모델은 이들의 동특성(Sub-Dynamics)까지 함께 구현해야하며[3] 제어기와 연결된 시뮬레이터 전체 시스템은 그림 1과 같다.

제어기를 설계하기 위해 지금까지 여러가지 방식으로 모델을 구하려는 노력이 진행되어 왔다. 그런데 모델을 얻는 과정에서는 다양한 방법을 동시에 이용하게 되며 건설된 보일러의 시공 자료, 재료 특성, 여러 동작점에서의 공정변수들의 정상 상태값과 입력이나 외란에 대한 동특성(Dynamics)등이 필요하다. 또 이런 자료의 유무에 따라 모델링이 방법도 크게 영향을 받게 된다. 기존의 모델링 방식에 대해 살펴보면, 첫째 수학적 모델링은 보일러의 각 부분에 열역학 법칙을 적용하고, 얻어진 각 식들을 종합하는 방정식으로 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 가정에 따라 얼마든지 변할 수 있으며 보일러 설계를 통해 축적된 오랜 경험, 기술, 자료 등이 있어야 가능하다. 두번째로 계수 추정 모델링은 보일러를 다수의 입력과 다수의 출력이 존재하는 집중 시스템으로 간주하여 입출력 변수를 정의하고, 모델의 구조를 정하고[5] 미지의 매개 변수를 입출력 자료를 이용하여 최소 자승법, 확장 칼만 필터법(Extended Kalman Filter ; EKF)

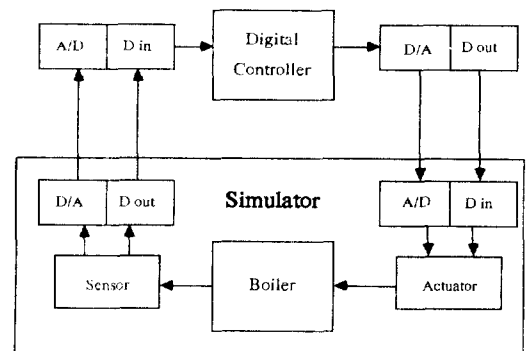


그림 1 시뮬레이션 시스템의 구조
Fig. 1 Simulation System Structure

*正 會 員 : 金星産電(株) 研究所 시스템研究室
 **正 會 員 : KAIST 電氣 및 電子工學科 博士課程
 ***正 會 員 : KAIST 電氣 및 電子工學科 副教授 · 工博
 §正 會 員 : KAIST 電氣 및 電子工學科 教授 · 工博
 接受日字 : 1990年 2月 9日
 1次修正 : 1990年 10月 16日

[6]등을 사용하여 추정해내는 방법이다. 이 방법은 보일러의 전체적 동특성 경향을 이해하기 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 외국의기술로 건설된 경우에 시공자료, 사용된 재료특성, 시운전 자료등을 입수하기 어렵고 많은 모델 개발 시간이 필요하다. 두번째 계수 추정 모델링은 작은 시간 간격으로 측정 기록된 입력력 데이터가 필수조건인데, 데이터 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 이용할 수 있는 한정된 자료만으로 모델을 얻을 수 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 특성을 결정하기 위해서는 대상 보일러의 동특성 데이터, 발전소 건설 자료가 필수적이지만 비슷한 규모의 타 발전소 자료와 열역학적 데이터가 이용할 수 있으리라 생각된다.

이 논문에서는 먼저 현재의 국내 여건하에서 모델 계수의 도출이 가능하고 이해하기 쉬우며 개발 기간이 짧은 모델링 방법으로서 이 신호 흐름도의 개념을 소개하고, 자연 순환식 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 미분방정식으로 나타내고 라플라스 변환을 이용하여 전달 함수로 표현하면 그림 2와 같은 블록선도를 얻을 수 있다[9]. 블록선도를 살펴보면 $1/(As+B)$, $K, 1/s$ 세가지 형태의 전달함수의 결합으로 구성되었으며 이들의 단위제단입력에 대한 응답은 각각 1차 지연요소, 계단함수, 그리고 램프함수이다. 전달함수와 단위 계단 응답을 대응시켜 그림 2의 구성요소인 전달 함수를 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 사용되고 보일러 동특성을 표현하는데에도 이용되고 있다[15]. 이 신호 흐름도에서는 전기적 시정수, 기계적 시정수 그리고 토크 상수와 역기전력 상수를 알 수 있다.

방정식과 전달함수에 의한 표현은 시스템의 해석에 편리하여 이미 개발된 해석 방법을 사용하여 시스템의 안정성 및 특성을 분석하기 쉽지만 시스템 전체를 쉽게 이해할 수 없는 단점이 있다. 한편 그림이나 블록 선도, 그리고 신호 흐름도 등과

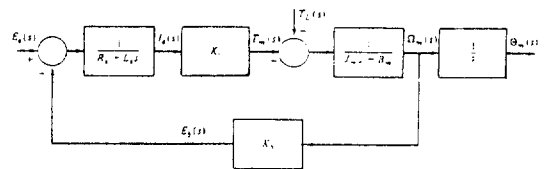


그림 2 직류 모터 블록 선도
Fig. 2 DC Motor Block Diagram

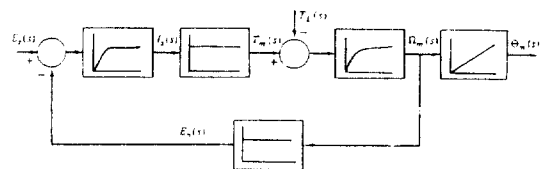


그림 3 직류 모터의 신호 흐름도
Fig. 3 DC Motor Signal Flow Diagram

같은 방식은 전체를 알기 쉽게 나타내지만 시스템의 성질을 직접 해석적으로 이끌어 내기 어렵다. 알고 있는 시스템을 해석적으로 표현하는 것과는 달리 모델링 과정에서는 시스템 전체를, 목적에 따라 여러가지 편리한 가정을 하여 종합적으로 표현하는 방식이 유리하다. 만일 전달함수를 얻는 과정을 거치지 않고 직접 시간 응답을 연결하여 모델링하고 실험이나 알려진 대표적 값(Nominal value)에서 특성을 결정할 수 있는 모델이 있다면 자료의 미비와 모델 개발 기간의 제한아래, 제어기 검증이라는 목적을 위한 시뮬레이터에 사용되기 알맞으므로 클레펜츠의 보일러 모델에서 사용된 이런 방법을 택하여 보일러를 모델링하고자 한다.

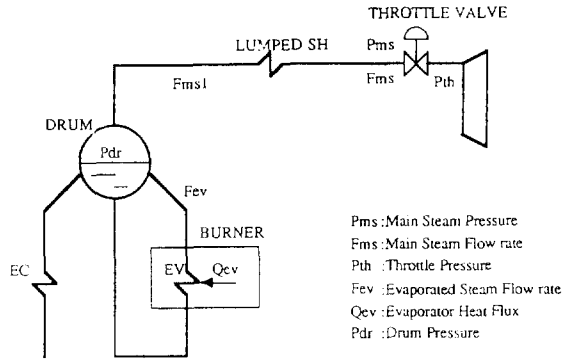


그림 4 입력 동특성에 대한 등가적 보일러
Fig. 4 Equivalent Boiler for Pressure Dynamics

2.2 드럼형 보일러 모델링

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

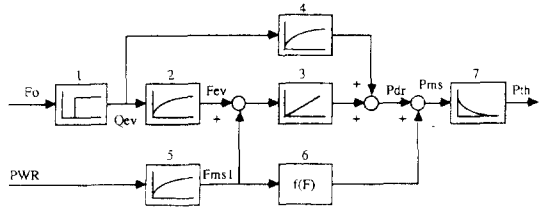


그림 5 압력 동특성 신호 흐름도
Fig. 5 Signal Flow Diagram for Pressure Dynamics

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 Superheater), 그리고 터빈 조절 밸브로 구성되어 있다. 드럼 내부 압력, 주증기 압력 및 드로틀 압력에 관한 신호 흐름도를 구성하면 그림 5와 같다.

블록 1은 연료 유입율과 증발기에 전달되는 열 전달율과의 관계를 나타낸다. 보일러주증기 압력에 대한 일반적 특성을 나타낸 그림 6(a)에서의 유효 지연시간(T_d)을 나타내며, 발전소의 연료종류 및 연소 형태에 따라 이미 실험적으로 정해진 값을 사용한다. 증발기 열량 변화에 의한 발생증기량의 변화를 블록 2에서 나타내었다. 블록 3는 발생한 증기와 터빈에서 사용되는 증기의 차이에

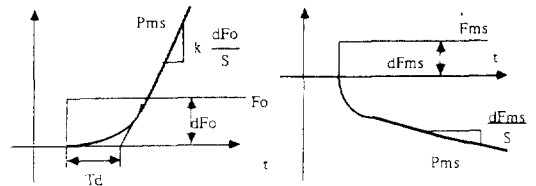


그림 6 보일러 압력 특성[8]
Fig. 6 Boiler Pressure Characteristics

의해 드럼 내부 압력이 점차 적분특성으로 변화하는 것을 표현하고 있다. 블록 4는 증기의 수급차에 의한 변화외에 부하에 따른 보일러 동작점 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 부

하조건에서의 두 압력차와 주증기량에서 선형 관계를 찾아 근사하였다. 그림 6(b)에서 알 수 있듯이 주증기량의 변화는 압력에 대한 외란으로 작용해서 급격한 압력변화를 가져오며 블록 6이 이런 현상을 표현하게 된다. 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 공기 및 노내압 동특성(Air Flow & furnace Draft Dynamics) 모델링

공기 및 노내압 제어 측면에서 본 보일러의 등가적 구조는 그림 7과 같다. 강압 통풍기(forced Draft Fan; FDF)가 불어 넣은 공기는 공기 예열기(Air Heater; AH)를 거쳐 보일러 연소실로 들어가 연소 가스가 되어 보일러를 통과하며 열을 전달하고 최후로 유인 통풍기(Induced Draft Fan; IDF)에 의해 외부로 빠져 나오게 된다. [10]

이런 등가적 보일러 구조에서 신호 흐름도를 구하면 그림 8과 같다. 블록 1과 3은 공기 제어 신호 FDa, FDb에 의한 강압 통풍기 A와 B의 베인 각도 변화를 표현한다. 각도에 따라 유입 공기량이 변화하는 것을 블록 2와 4에서 고려하였으며 이 두 공기의 합이 총 공기량이 된다. 한편 보일러

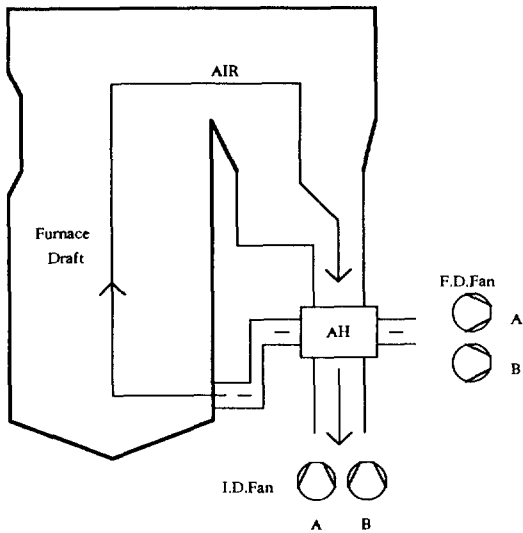


그림 7 공기 및 노내압 동특성에 대한 등가적 보일러
Fig. 7 Equi. Boiler for Air Furnace-Draft Dynamics

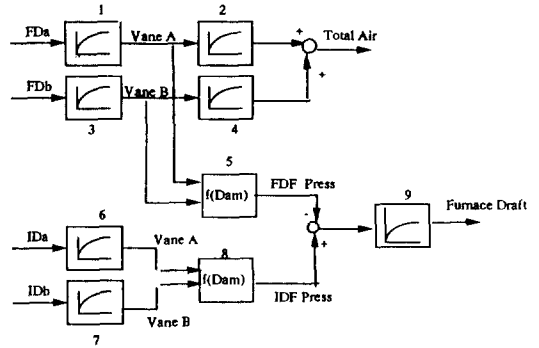


그림 8 공기 및 노내압 동특성 신호 흐름도
Fig. 8 Signal Flow Diagram for Air and Furnace Draft Dynamics

러 내부는 연소 가스의 대기 유출을 방지하기 위해 대기압 이하를 유지하며, 연소가스를 잘 순환시키기 위해 강압 통풍기 쪽의 압력을 유인 통풍기 쪽보다 높여 노내압(Furnace Draft)이라 하는 이 두 압력차를 일정하게 유지한다. 블록 6과 7은 유인 통풍기에 대한 동특성의 표현이다. 강압 통풍기의 토출 압력과 유인 통풍기의 흡입 압력은 각각의 베인 각도에 의해 결정되는 함수로 보고 블록 5과 8의 함수로 각각을 표현하였다. 그러나 노내압 변화를 제어가 감지하기까지는 시간 지연이 존재하므로 이것을 자연 요소로 모델링하여 블록 9에서 나타내었다.

2.2.3 수위 동특성(Drum Level Dynamics) 모델링

수위제어에 관한 등가적 보일러는 그림 9와 같다. 급수는 급수 펌프(Boiler Feed Pump; BFP)에 의해 절탄기에서 예열되어 드럼으로 공급되는데 드럼 내부는 급수와 증기가 섞여 있으면서 증기가 큰 부피를 차지하고 있고 온도는 급수의 온도보다 낮다. 그러므로 수위는 급수율이 증가하는 초기에는 드럼내의 증기 방울이 응축되고 이때문에 일시적인 수위 저하 현상을 보이고 일정시간 뒤에 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 터빈에서 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'현상이라

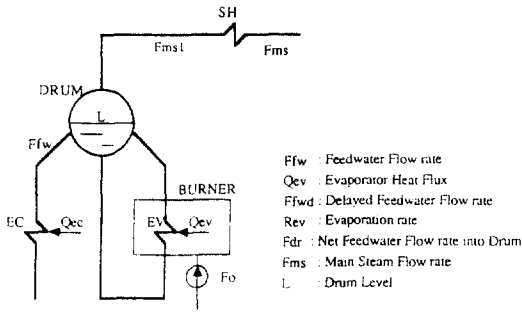


그림 9 수위 동특성에 대한 등가적 보일러
 Fig. 9 Equivalent Boiler for Level Dynamics

고 하며 그림 10에서 나타내었다[6][8].

등가적 모델과 이런 수위의 물리적 현상을 이용하여 신호 흐름도를 구하면 그림 11과 같다. 블록 1은 증발기 열량 증가에 따른 증기 발생으로 상쇄되는 급수율을 표현한다. 블록 2는 연료율과 급수율의 불균형에서 나타나는 드럼에 유입되는 순수

급수량을 나타내는 블록이다. 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 시간지연을 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 특이현상을 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.

2.2.4 온도 동특성(Temperature Dynamics)

모델링

대상 보일러는 온도제어 방식중 가장 보편적인 냉각수 분사방식이 사용되고, 과열기나 재열기는 모두 같은 온도 동특성과 구조를 가지므로 이 부

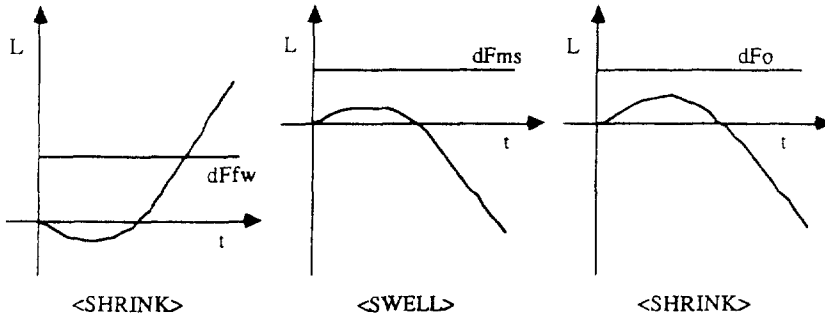


그림 10 Shrink & Swell현상[8]
 Fig. 10 Shrink & Swell Phenomina

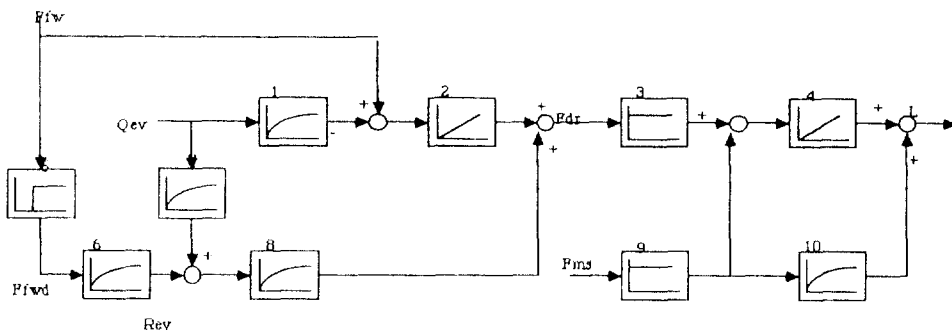


그림 11 수위 동특성 신호 흐름도
 Fig. 11 Signal Flow Diagram for Level Dynamics

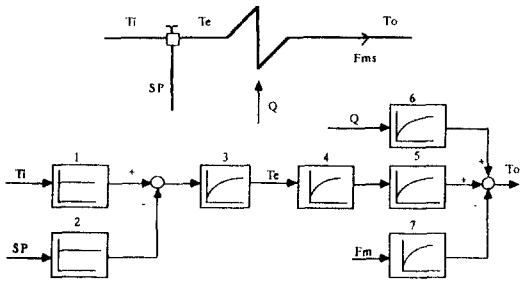


그림 12 과열기와 온도 동특성에 대한 신호 흐름도
 Fig. 12 Equivalent Heater and Signal Flow Diagram for Temperature Dynamics

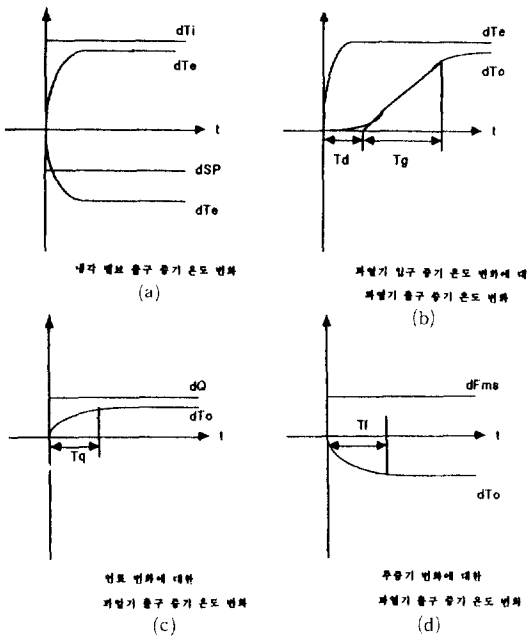


그림 13 과열기 온도 특성[8]
 Fig. 13 Heater Temperature Characteristics

분을 빼어 신호 흐름도 그림 12를 구하였다. 과열기 입력단 온도에 미치는 입력 증기온도의 영향을 블록1이 나타내고 냉각수 분사량 증가에 의한 온도감소는 블록 2가 표현하고 있다. 블록3은 밸브에서 과열기 입구까지의 시간 지연으로 이 세 블록에 의한 동특성은 그림13(a)에 나타난데로 2차 시간 지연특성을 보이는데 이를 1차 지연의 연속으로 모델링하여 블록 4와 5로 나타내었다. 과열기의 온도 증가 효과는 모두 과열기 출구에서 이루어지는 것으로 가정하여 과열기에 전달되는 열량 변화에 의한 온도 변화를 블록 6으로 나타내

고, 외란인 증기흐름 변화의 영향은 블록 7에서 나타내었다. 그러므로 그림 13(c)와 13(d)의 온도 특성을 모델에 구현하게 된다.

3. 검증 실험 및 검토

앞장에서 제안된 보일러의 각 동특성별 신호 흐름도에서 결정해야 할 블록들의 이득은, 많은 경우 변수와 제어입력의 정상상태 값을 이용 추정했다. 그리고 밖에서 관찰되지 않는 내부 변수는 신호 흐름도를 만들어 가는 과정에서 통찰에 의해 결정하였으며, 공정변수의 보편적 시간 특성에서 시정수를 추정하고 시뮬레이션으로 현장의 동특성과 접근시키며 조정하였다. 공정 변수의 목록, 변수 범위와 단위 그리고 50% 75% 100%보일러 출력 각각에서의 정상상태값을 표 1에서 보였다.

현장의 데이터가 일정한 관계를 찾기 어려울 만큼 불규칙하고 실제 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 허용할 수 없다면 비선형 함수로 보간하여 사용하였다.

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

3.1 실험 및 검토

- 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 : 현장에서 운전되는 제어기를 파악해서 프로그램으로 구현하고, 센서와 구동기까지 포함한 모델과 연결 실험한다. 드럼 보일러에서 중요한 제어는 크

표 1 각 동작점에서의 공정 변수 정상상태값

Table 1 Process Variable Steady-State Values at various Operating Point

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_0	(0.0~15.0)	Kg/cm ²	14.7	14.8	14.9
Furnace Draft Press	P_{FD}	(-100.0~50.0)	mmH ₂ O ₂	-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_0	(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	A_{Ab}	(0.0~500.0)	Ton/Hr	228	330	420
Exess Air Ratio	O_2	(0.1~10.0)	%	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 2 압력 동특성 변수 정상상태값

Table 2 Pressure Variable Steady-State Value

OP Point	50%			75%			100%		
	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/cm ²)	128	128.1	0.1	132	132	0	136	135.4	0.5
Psh(Kg/cm ²)	126.5	126.2	0.2	128	128	0	129.5	128.9	0.5
Pth(Kg/cm ²)	126	126	0	126	126	0	126	126	0

계 4가지이다[8].

- 주증기 압력 및 공기 제어기 : 증기의 압력에 따라 연료와 연소 공기를 함께 조절하여 증기 증발량을 제어한다.

- 노내압 제어기 : 노 내부 압력차를 유지하여 연소가스의 원활한 순환을 유지하는 제어이다.

- 증기 온도 제어기 : 과열기 및 재열기의 출력을

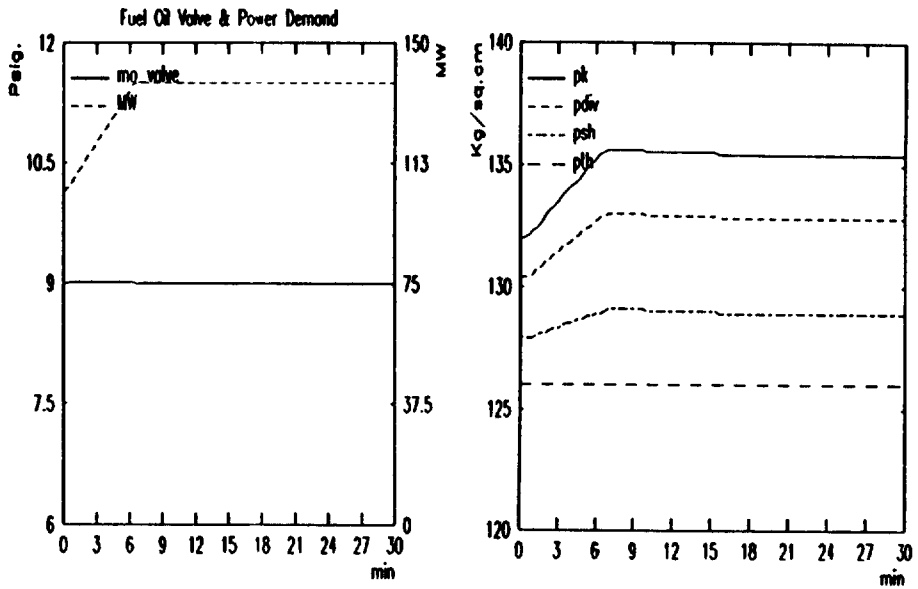


그림 14 부하 증가시의 제어기와 연결된 압력 변화
 Fig. 14 Controlled Pressure Dynamics at Load Increase

표 3 상용 시뮬레이터와의 비교

Table 3 Comparison of Simulator with commercials

	PROPOSED	Commerical
PURPOSE	controller test	Engineering Design Operator Training
TARGET	Drum Boiler	Fossile/Nuclear Overall Power Plant
H/W	16-bit CPU Board Signal I/O Board	Upper W/S Level Color Graphic Console
Man/Manchine Interface	LED/Motor Disply Recorder	Dedicated Panel (Controller Identical)
MODEL	50~100% Power Range	Start-Full Load- Shut Down (Full Range)
	Off-Line Coding	On-Line Graphic Configuration
	Dedicated (Drum Boiler)	General-Purpose
	Steady-State I/O Data	Thermal, Construction Data
	HEURISTIC APPROACH	ENGINEERING BASED

증기온도를 조절한다.

- 수위 제어 : 급수량을 사용 증기량에 맞추어 조절하는 제어로 드럼 수위에 중요한 영향을 끼치는 보일러의 변수인 수위, 급수량, 주증기량 세가지를 이용한 3요소 수위제어를 주로 사용한다.

iii) 제어기 검증

검증하고자 하는 DCS제어기의 실시간 실험을 수행한다. 여기서는 대표적으로 압력과 수위에 관해서만 제시한다.

A. 압력

서울 4호기는 증유전소식 평형통풍로로서[10]

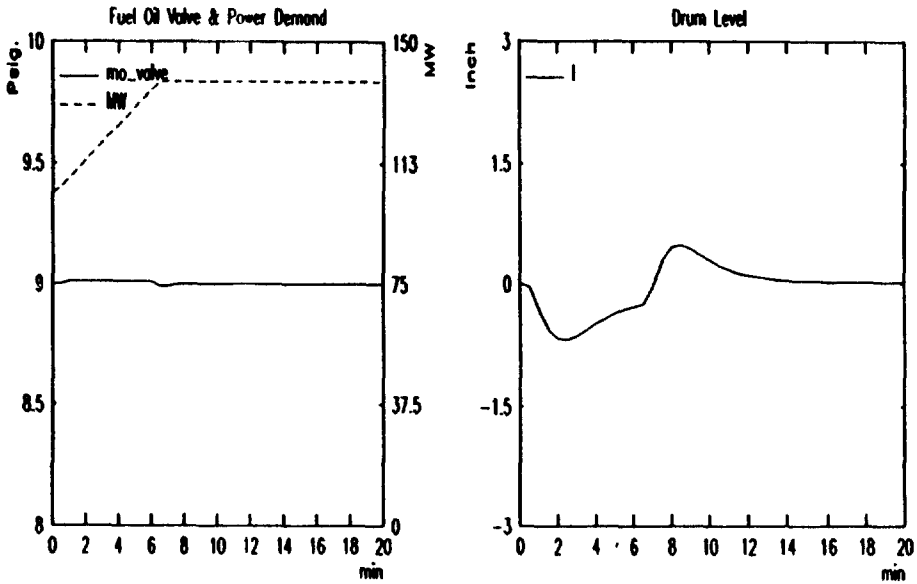


그림 15 부하 증가시의 제어기와 연결된 수위 변화
Fig. 15 Controlled Level Dynamics at Load Increase

발전소 부하신호의 최대변화율은 1분에 최대 부하 137.5MW의 4%이므로 이를 따라 그림 14(a)와 같이 부하를 변화시켜 본다. 제어기가 연료 밸브의 개폐를 조절하여 연료 유입률이 증가하고 이어서 증기 발생이 증가하여 요구되는 주증기량을 맞추어 주는 것을 (c)에서 볼 수 있다. 이와같은 방법으로 여러가지 부하변화에 대한 주요 압력 변수의 정상상태에서의 값을 표 2에서 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

수위에 관한 대상 보일러의 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 0포인트를 유지함을 그림 15에서 알 수 있다.

프로그램으로 묘사된 제어기와와의 통합 실험에서 모든 공정 변수가 50%~100%부하에서 기준설정값과 5% 이내의 오차로 일치하고 있음을 보였다. 그러나 최종적인 DCS제어기와와의 통합 실험은 이 보다는 큰 오차를 가지는데, 이는 제어기와 시뮬레이터 사이에서 신호가 교환될때 A/D, D/A변환

오차, 신호의 감쇄 및 잡음으로 이상적인 시뮬레이션 환경과는 다르기 때문이다. 그러므로 절대수치의 전반적 편차를 가져오게 되었다. 또다른 주요 오차원인은 현장의 공압제어기를 파악하는 과정에서 비선형 제어의 특성을 완전히 알아낼 수 없어 많은 부분에서 가정이 이루어 졌기 때문으로 생각된다. 끝으로 정상상태에 도달하는 시간에 관계되는 시정수도 동특성 자료의 부족으로 기준이 될 그래프가 없으므로 오버 슈트가 일어나지 않도록 조정하였기 때문에, 실제의 시간특성과 완전히 일치한다고 말할 수 없지만, 공정 변수나 제어 입력이 안정되고 동시에 최대 부하 신호 변화에서도 시간지연이 작으므로 비교적 정확한 시정수의 선택으로 볼 수 있다.

3.2 시뮬레이터 하드웨어 시스템

시뮬레이터는 플랜트의 특성을 쉽고도 다양하게 변경할 수 있도록 컴퓨터를 이용하는 것이 일반적으므로, 모델의 수정보완에 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 16과 같다.

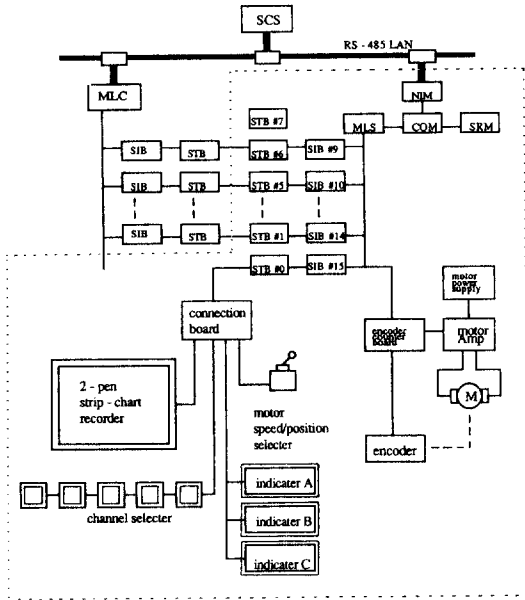


그림 16 시뮬레이션 시스템 하드웨어 구성
Fig. 16 Simulation Hardware System

4. 결 론

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

이 논문에서는 클레펜츠의 신호 흐름도 기법을 이용하여, 현장의 제어기에서 필요한 공정 변수를 모두 제공하는 드럼형 보일러의 모델을 제안하였다. 그리고 현장 제어기를 해석하여 모델과 연결, 시뮬레이션을 수행하여 모델의 기능을 평가하고, 이를 최종적으로 제작된 디지털 제어시스템과 연결하여 제어기의 동작을 검증하였다. 그리하여 제안된 모델이, 비교적 선형성이 만족되는 자동 제어 범위 안에서, 받아들일수 있는 오차범위를 가지고 보일러를 충분히 모사하는 것을 확인하였다. 실제로 운용되는 제어기, 센서 및 구동기를 보다 완벽하게 파악한다면, 선정된 계수를 조정하여현장의 공정값에 더욱 근접시킬 수 있을 것이다. 모델이 비록 서울화력 4호기라는 구체적 보일러를 대상으로 하였지만 화력발전소 보일러는, 종류가 같다면 발전 용량의 차이만 있을뿐 기본적 구조는

거의 유사하므로 제안된 모델의 기본적 형태는 다른 보일러에도 쉽게 적용될 수 있을 것이다. 그러므로 이 형태가 개발하려는 다중 루프 제어기의 검증에는 가장 적당한 형태이고, 모델링 기간을 최소화할 수 있으리라 생각된다.

발전소 시뮬레이터를 제작하기 위해서는 발전소와 제어기의 설계 및 제작 경험이있어야 한다. 그러므로 상용 시뮬레이터[12][13]를 제작하는 회사는 Bailey사와 Taylor사 정도이다. 제작된 시뮬레이터와 상용 시뮬레이션 시스템은, 기본 개발 목적이 다르므로 그 규모와 기능에서 비교하기 어렵지만 끝으로 이들 시뮬레이터와 제작된 시뮬레이터와의 기능적인 면을 간단히 비교해서, 앞으로 개선 방향을 모색하는데 참고를 삼기로 한다. 표 3에서 알 수 있듯이 제작된 시뮬레이터는 많은 제약을 안고 있고, 특히 모델이 모사할 수 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 제공할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 남해곤, "전력 플랜트 모델링", 전기학회지, 제38권, 제3호, 1989
- [2] 한국 전력 공사 기술 연구원, "발전소 제어용 디지털 계장 제어 시스템 개발(중간 보고서)", 1989
- [3] 황동환, "FTCS의 성능 시험을 위한 보일러 제어 시스템 시뮬레이터의 개발에 관한 연구", 전기학회 논문지, 제37권, 제11호, 1988
- [4] 이재용, "관류형 보일러의 비선형 저차 개발에 관한 연구", 한국 과학 기술원, 핵 공학과, 1986
- [5] 한국 전자기술 연구소, "공정정보 처리 시스템 개발에 관한 연구", 1985
- [6] A. Tyso, "Modelling and Parameter Estimation of a Ship Boip Boiler", Automatica, Vol. 17, No. 1, pp. 157~166, 1981.
- [7] R.B. Bell, K.J. Astrom, "Dynamic models for boiler-turbine-alternatots units: data logs and parameter estimation for a 160 MW unit", Ropotr TFRT-3192, Lund Institute of Technology, Sweden, 1987
- [8] Genter Klefenz, "Automatic Control of

- Steam Powe 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 4호기 운전 조작 설명서”, 1983
- [11] K.J. Astrom & Bjorn Wittenmark, “Computer Controlled Systems”, POrentice-Hall, 1984
- [12] Combustion Eng. CO., “CETRAN Software and Simulation Methodology”, Brocher
- [13] Bailey Co., “Bailey Power Plant Controls Simulator”, Brocher
- [14] 이재용, “관류형 보일러의 비선형 저차 모델 개발에 관한 연구”, 전기학회 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] 한국 전력 공사 기술 연구원, “주파수 조정 운전을 위한 터빈 조속기 및 보일러 제어계의 성능 개선”, 1987. 6
- [19] 한국 전력 공사 기술 연구원, “마이크로 컴퓨터를 이용한 전자제어 시스템의 고신뢰화에 관한 연구”, 1987. 5
- [20] 한국 전력 공사 영남 화력 발전소, “영남 화력 2호기 운전 조작 설명서”
- [21] 한국 전력 공사 울산 화력 발전소, “울산 화력 4호기 운전 조작 설명서”
- [22] 남해근, “Modelling and Control System Design Stydy of A Coal Fired Power Plant”, Univ. of Texas Austin, 1986.