

論 文
37~11~5

FTCS의 성능시험을 위한 보일러 제어시스템 시뮬레이터의 개발에 관한 연구

A Study on the Development of a Boiler Control System Simulator for Evaluation of the Fault Tolerant Control System

黃 東 渙* · 趙 瑛 朝* · 金 炳 國** · 卞 增 男[§]

(Dong-Hwan Hwang · Young-Jo Cho · Byung-Kook Kim · Zeung nam Bien)

요 약

본 논문에서는 FTCS (Fault Tolerant Control System)의 성능을 시험하기 위한 보일러 제어 시스템의 시뮬레이터를 설계, 구현하였다. 시뮬레이터는 보일러와 주변유닛, 아날로그 제어기로 구성되어 있다. 보일러는 선형 저차 모델을 사용하였으며, 주변유닛은 1차로 구현하였다. 아날로그 제어기는 모듈화된 디지털 제어기로 변환하여 보일러 모델과 함께 마이크로 프로세서 보드를 이용하여 구현하였다. 실험 결과 FTCS의 동작 시험에 매우 유용함을 입증하였다.

Abstract-In this paper a boiler control system simulator is designed and implemented in order to evaluate performance of the Fault Tolerant Control System. It simulates a boiler control system of a thermal power plant containing boiler process, peripheral units and analog controller. The simulator uses a low order linear model for boiler, first order models for the peripheral unit. Specifically the model of the analog controller is modularized and transformed to digital form in order to be implemented using a micro-processor board. The experimental results show the usability of the developed simulator for the performance test of the FTCS.

1. 서 론

산업의 발전에 따라 다양한 제품의 품질 향상을 위해 공정이 대규대화하고 복잡해 짐으로 이에 상응하는 제어 시스템의 설계 및 개발시에도 그 제어기

능의 적합 여부, 성능 평가, 설치 운용의 안전성 등의 점검을 위해 많은 실험을 필요로 한다. 그러나 프로세스에 직접 적용하는 실험은 경제성 및 안정성의 문제가 대두되므로 일반적으로 시뮬레이터에 의한 실험실 내의 운용 실험이 필요하게 된다.

일반적으로 시뮬레이터는 운전원의 작동 훈련 및 교육, 물리적 현상의 관찰, 새로운 제어 알고리즘의 개발 등을 주요 목적으로 사용되며, 그 이외에 여러가지 목적에 따라 그 특성이 달라진다. 물리적 현상의 관찰이나 운전원의 작동 훈련 및 교육을 위한 시뮬레이터는 목적에 맞는 수준의 정밀도를 가진 물리적 방정식을 이용하는 모델을 사용하며, 플랜트의 동특성 개선을 위한 제어기의 설계, 개발용의 시물

*正 會 員 : 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科 博士課程

**正 會 員 : 韓國科學技術大學 電子電算學科 助教授 · 工博

§正 會 員 : 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科 教授 · 工博

接 受 日 子 : 1988年 6月 20日

1 次 修 正 : 1988年 8月 23日

레이터는 중요 동특성 만을 나타내는 상태변수들로 이루어진 모델을 사용한다. 간단한 선형 시물변 시스템의 시물레이터는 아날로그 컴퓨터를 사용하여 구현 가능하지만, 복잡하거나 시변이거나 비선형 시스템의 시물레이터는 디지털 컴퓨터와 적절한 입출력 장치로서 비교적 쉽게 구현 가능하며, 또한 이경우에는 변경, 재구성 등이 용이한 장점을 가지고 있다.⁶⁾ Lausterer는 화력발전소용 벤손(benson)형 보일러를 대상으로 자동화 피라미드(automation pyramid) 개념을 이용하여 제어 시스템의 성능을 향상시키기 위한 TELEPERM M이라는 비집중 이산 공정 제어 시스템 시물레이션을 수행하였으며,⁷⁾ Lausterer, Franke, Eitelberg 등은 벤손 보일러의 모델을 개발하고 새로운 제어 구조를 제안하였다.⁸⁾ 최근 발전소 제어 시스템 고신뢰화의 하나의 방안으로, 기존 아날로그 제어기에 고장 탐지 및 back-up 제어 기능을 추가로 설치하는 FTCS(Fault Tolerant Control System)의 개발에 대한 연구가 진행되고 있는바^{6),7),8)} 이와 같은 FTCS의 성능시험을 목적으로 하는 시물레이터는 전술한 바의 일반적인 시물레이터 기능의⁹⁾ 에도 부가적으로 다음과 같은 기능들이 포함되어야 한다. 즉 공정자체의 중요 동특성 뿐아니라, 액츄에이터(actuator)의 모델과 제어 시스템의 모델을 포함하도록 하여, 정상 상태의 공정 및 아날로그 제어기로 연결된 폐루프의 동작 시물레이션 뿐만아니라, 제어기의 고장 상태 모델 및 이에 따른 과도 현상을 나타내며, back-up 제어기로의 스위칭과 스위칭후의 과도 상태에 대한 시물레이션 기능 등이 추가로 필요하다.

본 연구에서는 설치 적용의 전단계에서 화력발전소 보일러 아날로그(analog) 제어 시스템을 대상으로 FTCS의 성능을 시험하기 위한 특수 목적의 시물레이터를 한개의 마이크로 프로세서 보드(board)를 이용하여 설계 구현하였다.

구현시 보일러 모델은 제어 성능을 나타내는데 충분한 선형 저차 모델로 구현하였다. 가동되고 있는 모든 제어기를 위한 액츄에이터의 모델은 보일러 모델에 비하여 시정수가 짧으며 보일러 모델링 시에는 제외된다. 따라서 액츄에이터의 모델을 주변 유닛이라 정의하고, 그 모델을 구하기 위해서, 제어기와 전체 폐루프의 특성이 주어질 때, 그 특성을 만족하는 플랜트의 부류를 찾기 위한 식을 유도하고, 선형 1차 모델로 구현하였다. 아날로그 제어기들은 모뎀화된 디지털 시물레이터로 구현하였으며, 제어기와 플랜트가 결합된 전체 소프트웨어 구조를 실시

간 시물레이션이 가능하도록 구현하였다. 그리하여 발전소 나아가서는 제반 공정에 대한 실시간 시물레이션 및 제어 시스템 성능 평가에 활용할 수 있는 기본을 마련하였다.

본 논문의 구성은 제Ⅱ장에서 FTCS의 성능시험을 위한 시물레이터 구조를 정의하고, 제Ⅲ장에서는 시험용 시물레이터의 구현 및 실험 결과를 기술하고, Ⅳ장에서 검토 및 결론을 기술하고자 한다.

2. FTCS 성능 시험을 위한 시물레이터의 구조

신뢰도 개선을 위한 FTCS에 관해서 설명하면 다음과 같다.^{6),7),9)}

FTCS의 고장 발생시 동작은 기존 제어기에 의한 정상 동작중 고장이 발생하면 기존 제어기의 입출력 신호 분석에 의해 즉시 이를 탐지하고, 고장이 발생한 제어 루프의 기능을 back-up 제어기가 담당하도록 전환한다. 이의 블럭선도는 (그림 1)과 같으며, 크게 고장의 검출과 진단을 담당하는 FD(fault detection) 시스템과 back-up 제어와 제어기의 입출력 신호를 받아들이는 BU(back up)시스템으로 나누어진다.

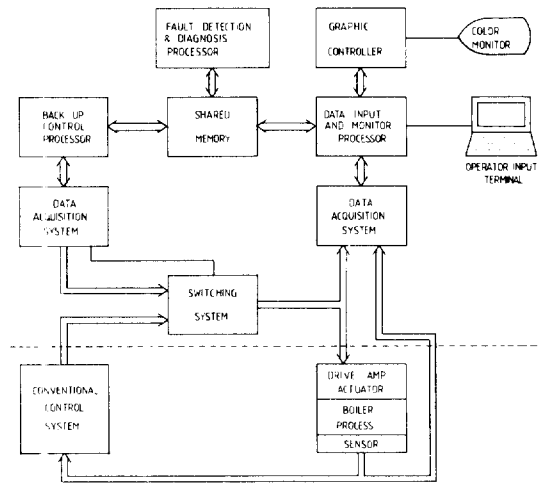


그림1 FTCS의 블럭선도

Fig.1 Block diagram of FTCS.

이러한 FTCS의 성능을 시험하기 위한 시물레이터의 설계시 고려할 사항은 다음과 같다.

1. 정상 동작시의 제어기와 프로세스의 동작을

실시간(real time)으로 모사해야 한다.

정상 동작 상태에서 고장탐지 기능의 정상 수행 여부 및 제어 시스템의 운전감시를 위한 제반 데이터를 제공해야 한다. 특히 정상 동작 중에 있는 제어기의 고장의 오판을 방지하기 위한 고장 검출 알고리즘의 성능 평가 및 FTCS의 외부 잡음(noise)에 의한 영향의 고려를 위한 모사이다.

2. 제어기 고장시에 제어기의 이상 동작을 실시간으로 모사해야 한다.

FTCS의 기본 기능인 고장 검출 및 스위칭, back-up에 대한 실험을 위한 모사에 있어서 실제의 고장과 근사해야 하며 고장의 모델을 근사시킴으로써 각 모델에 맞는 고장 검출 알고리즘이 결정된다. 고장은 제어기의 계수를 바꿔줌으로써 구현시킬 수 있다. 고장의 정도에 따라 계수 변화의 정도가 달라진다.

3. 조절기의 입출력, 디지털 입출력 등 주변기와의 입출력 모사가 실시간으로 가능해야 한다.

일반 공정 제어 시스템의 경우에는 시퀀스(sequence) 제어기 등 외부의 다른 제어 시스템과 정보를 교환하면서 동작되고 있으므로 FTCS의 정확한 동작시험을 위해서 이러한 기능도 모사해야 한다. 이 기능은 소프트웨어, 하드웨어 어느 것으로나 가능하다.

시뮬레이션의 대상인 울산화력 발전소 보일러 제어시스템 CONTRONIC-Ⅱ는 70년대 아날로그 IC 기술을 사용한 총 35가지 종류의 모듈로 구성되어 있고, 이를 조합한 360여장의 모듈이 보일러의 급수(feed water), 연소 공기, 연료, 온도 제어 등 총32개의 제어 루프를 형성하고 있다.

위의 사항을 고려한 시뮬레이터의 구성도는 (그림 2), (그림 3)과 같다. (그림 2)는 개략적인 구성도이고, (그림 3)은 제어루프 별로 본 상세 구성도이다. (그림 2), (그림 3)에서 주변 유닛은 보일러

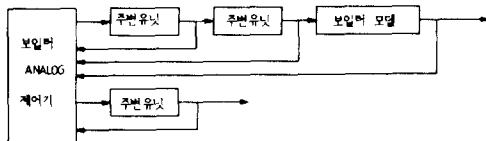


그림2 시뮬레이터의 구성도
Fig.2 Diagram of simulator.

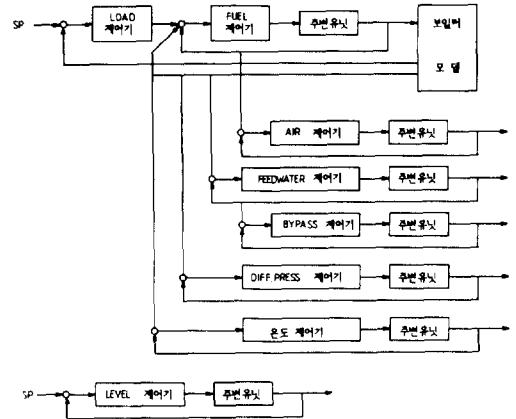


그림3 시뮬레이터의 상세 구성도
Fig.3 Detailed diagram of simulator.

의 중요 동특성 외에 시정수가 짧은 액츄에이터 (밸브, 댐퍼, 펌프 등)의 동특성이다. 주변 유닛에는 주로 PI제어기 혹은 P제어기가 부착되어 있다.

FTCS와 시뮬레이터가 결합된 시스템의 구성은 (그림 4)와 같다. 시뮬레이터는 제어기와 플랜트가 1개의 마이크로 프로세서에 의해 작동하며, FTCS와 공용의 버스(bus)에 물려서 동작된다. 모든 아날로그 제어기와 플랜트의 계산은 소프트웨어로 처리된다. FTCS에서 기존 제어기의 고장 탐지에 필요한 제어기의 출력은 43개 채널(channel)의 DAC(digital to analog converter)를 통해서 전달된다. 기타 모사에 필요한 정보의 교환은 VME버스를 통한 공유 메모리(common memory)를 통해서 이루어진다. 보일러 제어 시스템 CONTRONIC-Ⅱ의 경우 배전반, 터어빈 제어기, 시퀀스 제어기 등으로 부터 필요한 정보를 받아들이면서 동작된다. 이러한 기능은 오퍼레이터 스테이션(operator station)이라 명명한 하드웨어로 구현하였으며 배전반에서 조작하는 설정치 조정, 배율기의 조정, 터어빈 제어기, 시퀀스 제어기 등으로 부터 연결되는 제어기의 자동/수동 전환 등을 모사한다. 설정치나 배율기의 조정 기능은 가변 저항으로 구성하였고, 자동/수동 전환 기능은 온-오프(on-off) 스위치로 구성하였다. 오퍼레이터 스테이션은 또한 제어기에 여러가지 고장을 줄 수 있도록 하는 하드웨어도 포함한다. 이 경우에도 온-오프 스위치로 구성되어 있다. (그림 5)는 제작된 오퍼레이터 스테이션의 사진이다. (그림 6)은 시뮬레이터를 1개의 시스템으로 보았을 때 입출력 관계를 나타낸다.

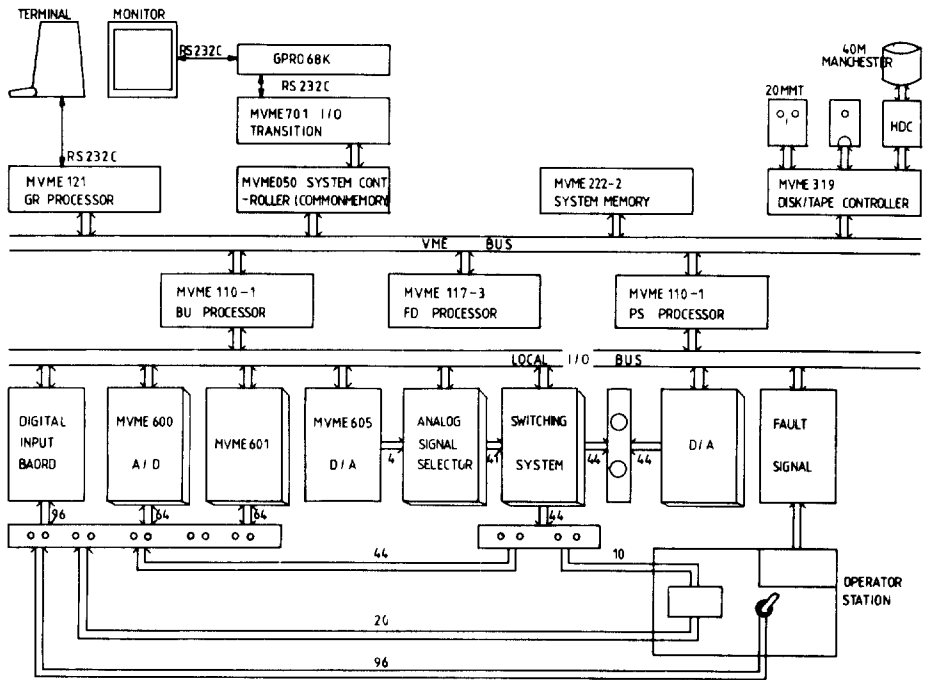


그림4 전체 시스템의 구성도
Fig.4 Overview of FTCS & simulator.

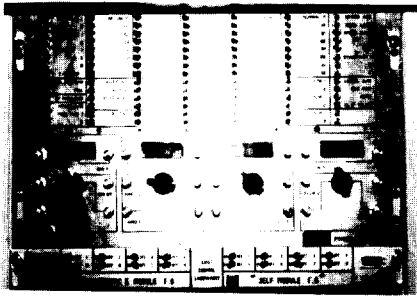


그림5 오퍼레이터 스테이션의 사진
Fig.5 Photograph of operator station.

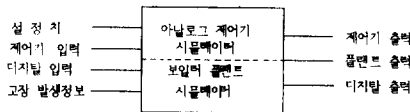


그림6 시뮬레이터의 입출력
Fig.6 Input & output of simulator.

3. FTCS시험용 시뮬레이터의 구현 및 실험

앞 장에서 서술한 구성에 따라 울산 화력발전소

의 보일러 제어시스템 CONTRONIC-II를 대상으로 부하 조건 75%~100%에서의 동작을 나타내는 시험용 시뮬레이터를 구현하였다.

3.1 아날로그 제어기의 구현

아날로그 제어기의 기능은 CONTRONIC-II에 관한 자료들을 해석함으로써 구현하였다. 원래의 제어기가 CONTRONIC-II의 여러 종류의 모듈의 조합으로 구성된 것처럼 제어기의 블럭선도(block diagram)에서 1개의 블럭을 기본 단위로 하여 모듈화함으로써 프로그램의 양을 줄이고, 제어 알고리즘이 바뀔 때도 대비할 수 있도록 하였다. CONTRONIC-II의 경우 PI제어기, D 제어기, SWI(set point integrator), 최대/최소 선택기, P 제어기, 릴레이(relay) 등 6가지의 모듈로 나눌 수 있다.

모든 프로그램은 C언어로 모듈러(modular)하게 구현하였으며, 아날로그 제어기는 마이크로 프로세서 속에서 동작시키기 위해서 디지털(digital)형태로 변환하였다. 원래의 아날로그 제어기와와의 오차를 충분히 줄이기 위해서 샘플링(sampling) 시간을 상용 S1PC(single loop programmable controller)와 같이 200[msec]로 두었다. 가장 많이 쓰이는 PI제어기의

경우 식 (1)과 같은 전달 함수 형태를 가진다.

$$T(s) = \frac{C(s)}{E(s)} = \frac{100}{X_o} \left(1 + \frac{1}{T_n s} \right) \quad (1)$$

$E(s)$; 제어기 입력

$C(s)$; 제어기 출력

X_o ; Proportional band[%]

T_n ; Integral time[sec]

이것을 오일러(Euler)의 간략화법을 이용하여 velocity 형태로 고치면 다음과 같다.

$$C(kh) = C(kh-h) + \frac{100}{X_p} [e(kh) - e(kh-h) + \frac{h}{T_n} e(kh-h)] \quad (2)$$

위의 (2)식을 anti-reset windup 기능을 첨가하여 C언어로 구현한 프로그램은 (그림 7)과 같다. 실제 COTRONIC-II 의 모듈에도 PI제어기 출력단에 제너 다이오드(Zener diode)가 부착되어 있어서 reset windup 현상을 방지하고 있다.

```

pi (tn, xp, pe, pel, va) /* pi unit */
double tn, xp, pe, *pel, *va;
{
    double limit();

    *va = limit(*va + (100.0/xp)*(pe - *pel + T*pe/tn));
    *pel = pe;
}
    
```

그림7 PI 모듈 프로그램

Fig.7 Program of PI module.

3.2 주변 유닛의 구현

보일러의 주변 유닛은 시뮬레이터의 구성도 중에서 제어기와 보일러를 제외한 부분을 총칭한다. 이것들은 물리적으로 밸브, 댐퍼, 펌프 등의 액츄에이터들이다. 대부분 보일러에 비해서 시정수가 짧으므로 모델링 시에는 제외되는 상태변수들이다. 그러나 이러한 액츄에이터의 경우, 대부분이 제어기가 부착되어 가동되고 있으므로 FTCS의 동작 시험을 위하여 모델이 필요하다. 정확한 모델을 얻기 위해서는 물리적인 특성을 나타내는 지배 방정식을 세워서, 입력에 대한 출력의 데이터를 가지고 지배 방정식의 계수를 추정해야 한다. 그러나 제어기의 출력은 데이터 logger에 기록되지 않으므로 플랜트의 모델링에 필요한 데이터는 전체적으로 부족하다. 이때 제어기의 구조와 계수 이득치는 알고 있으며, 이 제어기가 플랜트에 부착되어서 전체적으로 보일러는 잘 동작되고 있다. 제어기가 잘 동작되고 있다는 것을 이용하여 전체 폐루프의 동작 특성과 제어기를 알때 플랜트의 구조가 주어지면 플랜트의 계수들을 아래

와 같이 구할 수 있다.

가정;

- i) 플랜트는 제로(zero)가 없는 시스템이다.
- ii) 안정한 플랜트의 경우 이득은 알 수 있다.
- iii) SISO시스템만을 대상으로 한다.

폐루프의 특성을 다음의 3가지로 나누어서 생각하자.

- i) (그림 8)처럼 모든 폴(pole)이 left-half 평면에 있다.
- ii) (그림 9)처럼 폴의 실수부가 모두 허수 축에서 왼쪽으로 l 이상 떨어진 곳에 존재한다.
- iii) (그림 10)처럼 빗금 친 부분 내에 폴이 존재한다.

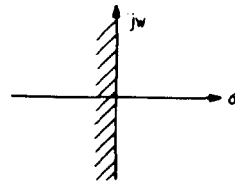


그림8 조건 i)의 영역

Fig.8 Domain of condition i).

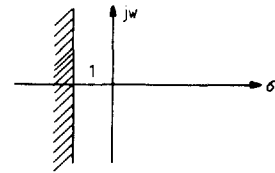


그림9 조건 ii)의 영역

Fig.9 Domain of condition ii).

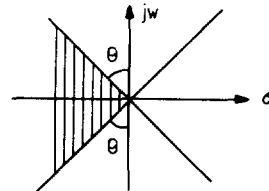


그림10 조건 iii)의 영역

Fig.10 Domain of condition iii).

i)의 특성은 제어 시스템이 가져야할 특성이며 가장 약한 조건이다. ii)는 i)보다 강한 조건이며 여유

(margin)를 l 만큼 가진다. iii)은 케루프의 특성을 댐핑 (damping)으로 준 경우이다.

케루프의 전달 함수가 다음과 같이 주어진다 고하자.

$$T(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_0 s^n + \dots + b_m}{a_0 s^n + \dots + a_n} \quad (n > m, a_0 > 0) \quad (3)$$

이때

$$f(s) = a_0 s^n + \dots + a_n \quad (4)$$

이라 두고, i)의 경우의 조건을 만족하기 위해서

Routh Hurwitz^{10),11)}조건을 이용하면

$$\nabla_k = \begin{vmatrix} a_1 a_3 \dots a_{2k-1} \\ a_0 a_2 \dots a_{2k-2} \\ 0 a_1 \dots a_{2k-3} \\ 0 a_2 \dots a_{2k-4} \\ \dots \\ 0 0 \dots \dots \\ 0 0 \dots \dots \end{vmatrix} \quad (a_k = 0 \text{ for } k > n)$$

$$\nabla_k > 0 \quad (k=1, \dots, n) \quad (5)$$

따라서 (5)의 조건을 만족하는 a_k 들을 이용하면 된다.

ii)의 경우 s 평면을 $-l$ 만큼 평행 이동한 평면을 s_1 이라 하면 $s_1 = s - l$

$$f(s_1) = f(s - l) = a_0 s^n + \dots + a_n \quad (6)$$

(6)에다 (5)식을 이용하면 된다.

iii)의 경우 우선 (그림 11)의 평면을 생각해 보자.

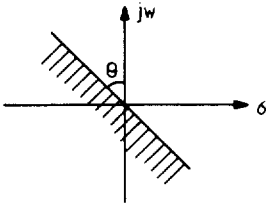


그림11 조건 iii-1)의 영역
Fig.11 Domain of condition iii-1).

s 평면을 θ 만큼 회전 이동시킨 평면을 s_2 라고 하면 $s_2 = s \cdot \exp(j\theta)$ 이므로,

$$\begin{aligned} f(s_2) &= a_0 \exp(jn\theta) s^n + \dots + a_n \\ &= \{ a_0 \cos(n\theta) s^n + \dots + a_n \} + j \{ a_1 \sin(n\theta) s^n + \dots \\ &\quad + a_{n-1} \sin\theta \} \\ &= (c_0 s^n + \dots + c_n) + j(d_0 s^n + \dots + d_n) \end{aligned}$$

계수가 복소수인 다항식의 모든 근이 left-half 평면에 있을 조건으로부터¹⁰⁾

$$\nabla_{2p} = \begin{vmatrix} d_0 d_1 \dots d_{2p-1} \\ c_0 c_1 \dots c_{2p-1} \\ 0 d_0 \dots d_{2p-2} \\ 0 c_0 \dots c_{2p-2} \\ 0 \dots \dots \\ 0 \dots \dots \end{vmatrix} \quad (p=1, \dots, n, a_k = b_k = 0, k > n)$$

$$\nabla_{2p} > 0 \quad (p=1, \dots, k) \quad (7)$$

이어야 한다

다음에 (그림 12)의 평면을 생각하면 s 평면을 $-\theta$ 만큼 회전 이동하여 $s_3 = s \cdot \exp(-j\theta)$ 라 하고 위의 방법처럼 유도하면 (7)형태의 또 다른 조건을 얻을 수 있다.

두 가지의 조건을 모두 만족시키는 a_k 들을 이용하면 된다.

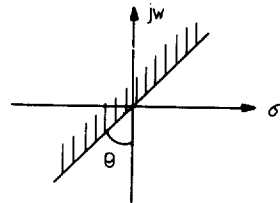


그림12 조건 iii-2)의 영역
Fig.12 Domain of condition iii-2).

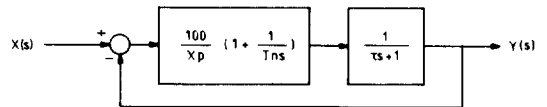


그림13 PI 제어기
Fig.13 PI controller.

우선 보일러의 주변 유닛의 플랜트를 찾는 데 이용하기 위하여 (그림 13)처럼 PI제어기에 1차 플랜트가 결합된 경우, 전달함수는

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{100K / X_p T_n (T_n s + 1)}{s^2 + (X_p + 100K) / X_p \tau s + 100K / X_p \tau T_n} \quad (8)$$

위에 서술한 각각의 performance를 만족하기 위한 조건을 구하면

i) $\tau > 0$

$$ii) \frac{X_p + 100K}{X_p \tau} > 2l$$

$$\frac{100K}{X_p T_n \tau} \frac{(X_p + 100K) l}{X_p \tau} + l^2 > 0$$

iii) $\tau > 0$

$$\left(\frac{X_p + 100K}{X_p \tau} \right)^2 \cos^2 \theta - \frac{100K}{X_p T_n \tau} \sin^2 2\theta > 0$$

$$\left(\frac{X_p + 100K}{X_p \tau} \right)^2 \cos^2 \theta + \frac{100K}{X_p T_n \tau} \sin^2 2\theta > 0$$

연료 제어기의 내부 루프에서 PI계수 $X_p=140$, $T_n=10$ 이며, 운전 데이터로부터 $K=0.82$ 를 얻을 수 있다. 이때 특정 방정식은 $s^2 + \frac{1.82}{\tau}s + \frac{0.373}{\tau}$ 이므로 위의 조건들을 이용하여 다음과 같이 τ 의 값을 추정할 수 있다.

- i) $\tau > 0$
- ii) $l=0.1$ 이면 $0 < \tau < 9.1$
- iii) $\theta=45^\circ$ 이면 $0 < \tau < 4.4$

실제 구현 시에는 PI제어기를 가진 플랜트의 경우에 플랜트를 1차 선형모델을 두고, 조건 iii)에서 $\theta=45^\circ$ 를 만족하는 계수중 오버슈트가 5% 되는 값을 택하였다. 연료 제어기의 내부 루프의 경우 $\tau=4.0$ 으로 구현하였다.

3.3 보일러 모델의 구현

보일러 모델에는 여러 종류가 있다. 목적에 따라 제어기 개발용과 시뮬레이션용으로 나눈다. 혹은 지배 방정식의 형태에 따라 선형 모델과 비선형 모델로 나눈다. 선형 모델의 경우 가동점에 따라 계수가 달라진다.

본 논문에서는 기존에 제시된 선형 저차 모델을 사용하였다. 선형 저차 모델은 최근에 많이 연구되고 있으며, 주로 몇 초에서 30분 정도까지의 제어시스템의 안정도 시험용이다. 제시된 선형 저차 모델중 가장 최근에 제시된 Modified Laubli와 Fenton의 모델을 이용하였다. 보일러 모델의 블록 선도는 (그림 14)와 같다. (그림 14)에서 전달함수를 구하면 다음과 같다.

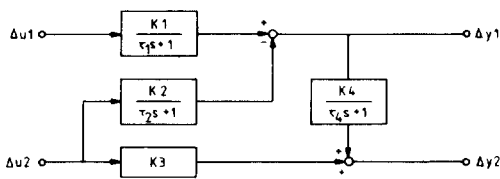


그림 14 선형 저차 보일러 모델
Fig.14 Linear low order boiler model.

$$\Delta y_1 = \frac{k_1}{\tau_1 s + 1} \Delta u_1 - \frac{k_2}{\tau_2 s + 1} \Delta u_1 \quad (9)$$

$$\Delta y_2 = \frac{k_1 k_4}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \Delta u_1 + \left\{ k_2 - \frac{k_2 k_4}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \right\} \Delta u_2 \quad (10)$$

u_1 : Fuell oil flow rate
 u_2 : SP load demand

y_1 : Live steam flow rate

y_2 : Live steam pressure

부하조건 75%~100% 사이에서의 시운전 데이터로부터

$\Delta u_1=0.56, \Delta u_2=0.68, \Delta y_1=0.36, \Delta y_2=0.65$,
이며, 뒷식으로 부터,

$$\Delta y_1 = k_1 \Delta u_1 - k_2 \Delta u_2 \quad (11)$$

$$\Delta y_2 = k_1 k_4 \Delta u_1 + (k_2 - k_2 k_4) \Delta u_2 \quad (12)$$

이다. 그리고 시운전 데이터로 부터, 부하를 증가시켰을 때, 10~20분 정도의 과도기간(transient period)를 가짐을 볼 수 있었다. (1), (2)식을 만족하면서, 15분 정도의 과도기간을 가지도록 각각의 계수를 구하였다.

주변 유닛과 보일러는 소프트웨어로 구현시키기 위해서 아날로그 플랜트를 디지털 형태로 근사화하여야 한다. 주변 유닛과 보일러는 연속 시스템을 zero-order 샘플링하는 것으로 근사화하였다. 그 개념도는 (그림 15)와 같으며, 다음의 방정식에서

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bu(t) \quad (13)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (14)$$

인 시스템을 zero-order 샘플링하면,

$$x(kh+h) = \phi x(kh) + \gamma u(kh)$$

$$y(kh) = Cx(kh) + Du(kh)$$

이다.

여기서,

$$\phi = \exp(Ah)$$

$$\gamma = \int_0^h \exp(As) ds B$$

이다.³⁾

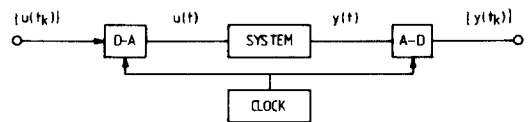


그림 15 Zero-order 샘플링
Fig. 15 Zero-order sampling.

3.4 실험 및 검토

시뮬레이터의 소프트웨어는 주 루틴(main routine)과 인터럽트 서비스 루틴(interrupt service routine)으로 나누어진다. 디지털 시스템으로 동작되는 시뮬레이터의 샘플링 주기를 일정하게 하고 FTCS와 원활하게 동작하기 위해서 제어기와 플랜트의 계산은 인터럽트 서비스 루틴내에서 수행한다. 타이머를 이

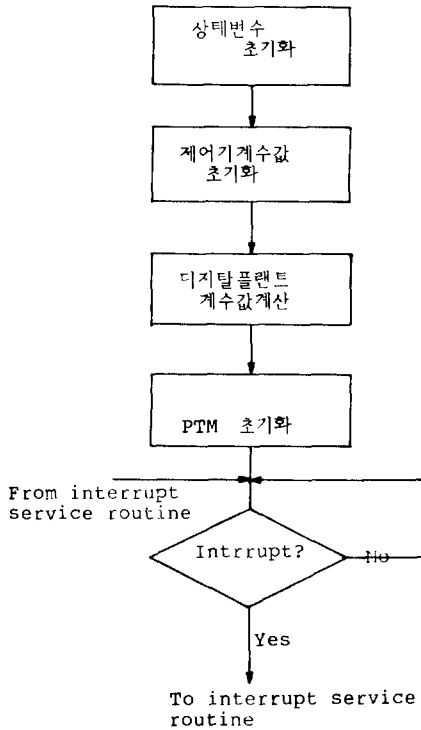


그림 16 소프트웨어 주루틴 흐름도
Fig. 16 Software main routine flow chart.

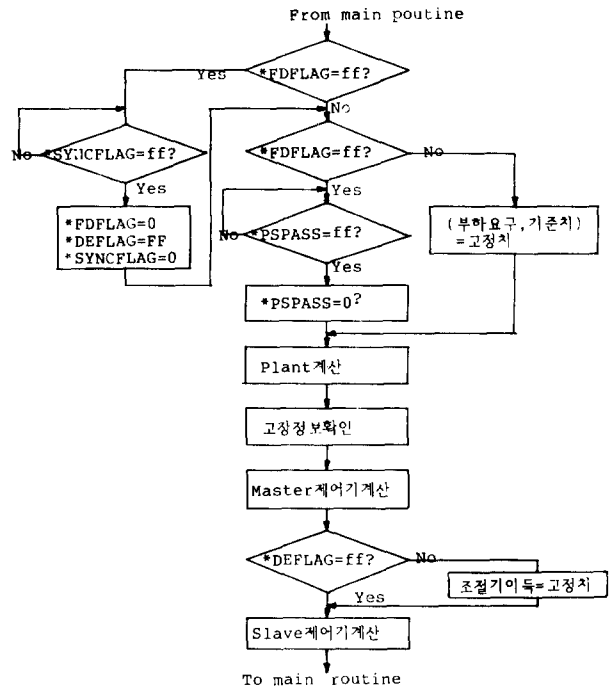


그림 17 소프트웨어 인터럽트 서비스 루틴 흐름도
Fig. 17 Software interrupt service routine flow chart.

용해서 5[msec]마다 인터럽트를 걸어 200[msec]이내에 한 주기의 시뮬레이션을 끝내도록 하였다. 특히 FTCS의 경우 실제 플랜트에 적용할 경우 플랜트와 어떠한 정보도 교환하지 않는다. 따라서 시뮬레이터 소프트웨어는 FTCS에 정보를 주지 않으며 FTCS로부터 운전 상태의 정보만을 받아들여서 실시간 시뮬레이션과 동작 특성 시험 환경을 제공할수 있도록 구현하였다. 초기에 FTCS가 동작되지 않을 때도 독자적으로 시뮬레이터가 동작되며 FTCS가 동작되면 그 정보를 받아들여서 FTCS의 동작실험에 필요한 데이터를 실시간으로 제공한다. (그림 16)과 (그림 17)는 소프트웨어의 순서도(flow chart)이다. 주루틴에서는 시뮬레이터가 원활히 동작하도록 준비하며 그것이 끝나면 계속해서 인터럽트만을 기다린다. 인터럽트 서비스 루틴내에서는 FTCS가 표시한 플래그(flag)들을 확인하면서 FTCS가 잘 동작하는지의 시험을 위한 시뮬레이션을 수행한다. 정상 동작시에는 제어기의 계수(parameter)가 정상 동작일 때의 값을 가지고 계산한 출력을 내보내며, 고장 동작 시에는 고장난 제어기에 대응하는 계수의

값을 바꾸어서 계산한 제어기 출력을 내보낸다. 또한 백업 제어 수행시에는 백업 제어기의 출력을 시뮬레이터가 받아들여서 백업제어기가 정상 동작시의 제어기 출력과 같은 역할을 수행하는지의 여부도 실험하였다. (그림 18)은 주요 제어 루프의 하나인 부하제어기의 출력을 X-Y plotter로 그린 것이다. 앞의 제어 출력은 정상 동작시 기준 제어기의 출력이

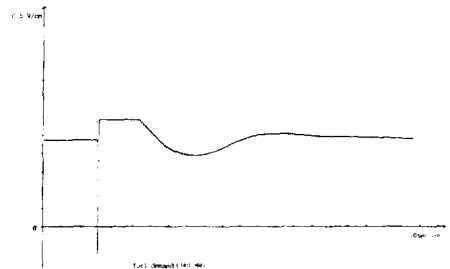


그림 18 부하 제어기의 출력
Fig. 18 Output of load controller

다. 뒤의 출력은 부하 제어기에 고장을 주었음에 고장 탐지후 기존의 제어기 출력을 절환한 백업 제어기의 출력이다. 고장의 영향에 따라 30초 정도의 과도 현상을 보인 후 기존 제어기의 출력과 같은 출력을 내는 백업 제어기의 출력을 볼 수 있다. (그림 19)는 시뮬레이터가 제공하는 제어기의 출력값과 센서의 출력값을 FTCS의 그래픽 디스플레이(graphic display)를 통해서 본 사진이다. 정상 상태(steady state)에서의 제어기 출력값과 플랜트의 출력 값을 잘 알 수 있다. (그림 20)은 고장을 주고 백업 제어를 수행했을 때 연료의 플로우(flow)량을 보여준다. 고장 탐지후 동작된 백업 제어기에 의해서, 고장에 의한 과도현상을 거친후 정상 제어기가 동작할 때와 같은 플랜트의 동작을 보여준다.

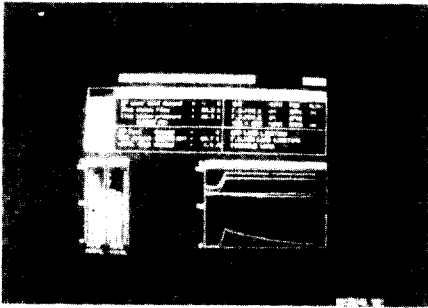


그림19 제어기와 센서의 출력
Fig. 19 Outputs of controllers and sensors.

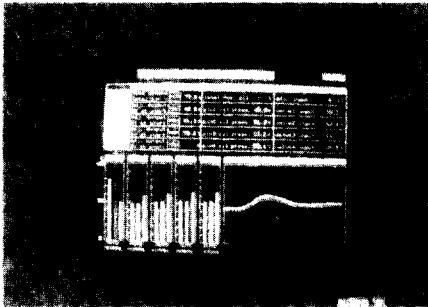


그림20 연료의 흐름량
Fig. 20 Flow rate of fuel.

4. 결 론

본 연구에서는 설치 적용 이전 단계에서 화력발전소 보일러 아날로그 제어 시스템을 대상으로 하는 FTCS의 성능을 시험하기 위한 디지털 시뮬레이터

를 설계, 구현하였다. 시뮬레이터의 역할은 정상시와 고장시의 보일러 아날로그제어기(CONTRONIC-Ⅱ)와 보일러 프로세스의 동작을 모사하는 것이다. 이러한 동작을 위해서 다음과 같은 기능을 구현하였다.

- i) 정상 동작은 물론 고장 동작 기능을 갖는 보일러 아날로그 제어기 기능
- ii) 제어 입력으로부터 프로세스값(센서 신호값) 계산 기능
- iii) 배전반에서 운전원이 조작하는 설정치 조정, 배양기 조정, 제어기의 자동/수동운전 절환 기능

i)의 기능은 CONTRONIC-Ⅱ의 자료를 해석함으로써 구현하였고, 고장 동작 기능은 제어기의 계수값을 변화시키는 방법을 취하였다. ii)의 기능을 위해서 보일러 모델이 필요로 하며, 그 모델을 얻기 위해서 시운전 데이터를 사용한 저차 모델을 이용하였다. 각 액츄에이터의 모델은 1차 모델을 활용하여 간략화하였다. iii)의 기능을 위해서 오퍼레이터 스테이션이라 명명한 하드웨어를 제작하였다.

기존의 제어기 고장시에 대처되는 백업 제어기의 동작과 플랜트에 미치는 영향을 보임으로써, FTCS의 성능평가에 매우 유용함을 실험을 통하여 입증하였다.

이 시뮬레이터는 다른 발전소 뿐만아니라 일반 산업 공정을 위한 시뮬레이션에도 변경 적용이 용이하며, 보다 진보된 제어 알고리즘을 사용한 제어 시스템의 성능평가에도 효율적으로 이용될 수 있다. 또한 복잡한 공정에 대한 실시간 시뮬레이션에도 다중 프로세서를 이용하여 요구되는 계산속도로 구현할 수 있다.

참 고 문 헌

- 1) C. Herget의 "Parameter Modelling and Verification of Low Order Boiler Models", IEEE. PAS. vol. PAS-95, no.4, July / August, 1976.
- 2) G.K. Lausterer, "Optimization of Power Plant Control by Consistent Application of Mathematical Models", PROCESS AUTOMATION, 1983.
- 3) K.J. Åström, "Computer-Controlled Systems", Prentice-Hall, 1984.
- 4) F. Hagedorn, Dr. G. Klefentz, "H & B Power Station Control", H & B monograph 3587EN.
- 5) Smith, "Digital Computer Process Control", INTEXT Educational Publisher, 1972.

- 6) 조 현 용, "화력 발전소를 대상으로 한 백업 제어 시스템의 연구", KAIST, 1986.
- 7) 문 봉 채, "신형 동적 시스템에서의 고장 진단 알고리즘", KAIST, 1986.
- 8) 황 동 환, "보일러 제어 시스템의 시뮬레이터를 위한 모델 구성에 관한 연구", KATST, 1987.
- 9) 김 지 흥, 조 현 용, 정 명 진, 변 증 남, "발전소 보일러 제어기에 적용한 FTCS의 연구", 대한전자공학회 지 제24권 1호, 1987.
- 10) F.R. Gantmacher, "The Theory of Matrices", Chelsea Publishing Company, 1960.
- 11) B.C. Kuo, "Automatic Control Systems", Prentice-Hall, 1982.
- 12) 울산 화력 발전소 4,5,6호기 운전 조작 설명서, 대우 엔지니어링, 1980.
- 13) G.K. Lausterer, J.Franke, E.Eitelberg, "Modular Modelling of Applied to a Benson Boiler", Proc. of IFAC Workshop on Modelling and Control of Electric Power Plants, 1983.