

# 퍼지 논리를 이용한 드럼형 보일러의 자동정지에 관한 연구

°이한오, \*이재혁, 황동환, 변중남

°금성 산전 연구소, \*한국과학기술원 전기 및 전자공학과

## A Study on Automatic Shutdown of Drum-type Boiler using Fuzzy Logic.

°Hanoh Lee, \*Jae-Hyuk Lee, Dong-Hwan Hwang, Zeungnam Bien

°Goldstar Industrial Systems Co., Ltd.

\*Dept. of Electrical Engineering, KAIST.

### ABSTRACT

There has been continous effort to achieve total automation of the power plants. But due to complexity, nonlinearities and time-varying properties of the system, no success has been reported if conventional and/or modern control theories are applied. In spite of this, the start-up and shutdown operations are successfully performed by skilled human operators who are able to utilize a great wealth of knowledge and past experiences.

In this paper, in order to automate the shutdown operation of power plants, it is proposed that the operation be performed by a more efficient method than the current used, through dividing the total process into several subprocesses, introducing checkpoints, and using fuzzy logic. For this, fuzzy logic controllers and fuzzy decision-makers are designed and the validity is shown by simulation via a set of piecewise continuous shutdown models.

### 1. 서론

과학 기술의 눈부신 발전으로 전기에 대한 사회적 수요가 증가하면서 발전소를 자동화하려는 노력이 꾸준히 진행되었다. 그래서 1980년을 전후하여 거의 모든 전력 계통 제어에 컴퓨터 제어 시스템을 이용하게 되어 디지털 컴퓨터에 의한 정상 운전의 자동화가 이루어지게 되었다. 그러면서 현재에는 기동 및 정지의 자동화까지 포함하는 종합적인 자동화를 시도하려는 단계에까지 기술이 발전되었지만 아직 해결해야 하는 많은 문제점들이 존재한다.

실제로 1980년대 중반부터 부분적으로 사용되는 연속형 제어기와 시퀀셜(sequential) 논리를 이용한 자동화 설비가 건설되고 있는 발전소에 설치되어 운영되기 시작하였다. 그러나 이러한 제어 시스템만으로는 발전소의 동특성의 변화나 예상치 못한 특성의 발생, 설비의 변경 및 교체, 시스템의 복잡성, 비선형성, 시변 특성, 시간 지연, 불안정성 및 불확실한 정보들과 같은 상황 변화에 대해 효과적으로 대처할 수 없기

때문에 아직까지도 인간의 개입을 필요로 하고 있다. 특히 발전소는 복잡한 특성을 갖는 MIMO(multi-input multi-output)의 대표적인 시스템이므로 전체 동특성을 파악하고 여기에 현대적인 제어 이론들을 적용하는 것 또한 아주 어려운 경우가 대부분이다. 그래서 구발전소의 경우 운전원들에 의해 수동으로 운전하는 것이 더 유리한 실정이다.

그러나 이러한 시스템의 여러 불확실한 정보들과 복잡한 해석없이도 오랜 경험과 지식으로 숙련된 운전원들의 지식을 쉽게 다룰 수 있는 퍼지 논리를 이용하여 제어를 구성하는 것이 가능하다. 이점을 이용하여 퍼지 논리를 발전소 정지 자동화에 응용할 수 있다. 즉, 시스템의 부정확한 정보에도 불구하고 이러한 상황에 대처하여 숙련된 운전원들은 운전을 잘 수행하고 있으므로 이 운전원들의 판단, 사고 및 동작등을 퍼지 논리를 포함하는 시스템 기술언어로 표현하고 이러한 구체적인 표현들을 이용하여 퍼지 제어를 구성할 수 있다.

이 논문에서는 발전소의 자동 정지를 위한 퍼지 논리의 적용 가능성을 보이기 위하여 화력 발전소의 드럼형 보일러를 선정하고 구체적으로 대상 시스템의 정지에 숙련된 운전원의 경험과 지식을 바탕으로 구어적인(linguistic) 변수를 다루기 위한 도구로서 퍼지 집합 개념을 이용하여 퍼지 제어를 구성할 수 있음을 보이겠다. 이를 위해 전체 정지 과정을 여러 개의 부과정(sub-process)들로 나누고 각각의 부과정들의 경계가 되는 시점을 checkpoint라고 정의한 후 각 부과정별로 단순히 시퀀셜 논리를 이용하고 있는 기존의 제어 구조에 좀더 확장된 제어 방법으로 퍼지 논리를 이용하겠다. 여기에는 퍼지 제어기 뿐만 아니라 바로 다음에 수행될 부과정으로 제어 순서가 넘어갈 수 있는 시스템의 상태가 되었는지를 판단하는 판단자(decision-maker) 그리고 기타 다른 시퀀셜 제어 기동으로 구성될 수 있다. 이 논문에서는 부과정 중에서 부하감발(load down, 공급 전력의 감소)을 하는 부과정을 예로 하여 이 부과정 제어에 필요한 퍼지 제어기와 다음 부과정으로 넘어가는 것을 판단하는 계통 병해(line-off, 터빈과 발전기를 분리함으로써 전력 생산을 중단하는 작업) 판단자를 구성하고 따로 구성된 보일러 모델을 이용하여 모의 실험을 함으로서 자동 정지에 퍼지 논리가 훌륭한 도구로 적용될 수 있음을 보이겠다.

## 2. 정지 운전

### 2.1 대상 시스템

여기에서 대상으로 선정된 시스템은 서울 화력 발전소 4호기이며 이 발전소는 명형 통풍식, 자연 순환식 설비와 드럼형 보일러를 갖는 중유 전소식 발전소이다. 그림 1에 블럭도가 나타나 있고 그 사양은 다음과 같다.

- Maximum Power : 137.5 MW
- Maximum Steam Evaporation : 450 Ton/Hr.
- Steam Pressure : 126.6 Kg/cm<sup>2</sup>
- Steam Temperature : 540 °C

여기서 보일러 급수펌프(BFP, boiler feedwater pump)에 의해 물은 절탄기(EC, economiser)에서 예열된 후 드럼에 공급된다. 물은 버너에 의해 증발기(EV, evaporator)에서 열에너지를 흡수하여 증기로 변환 후 드럼에 모인다. 드럼 상부에 모인 증기는 제 1과열기(S/SH1, 1st superheater), 제 2과열기 그리고 제 3과열기를 거쳐 터빈에 공급된다. 여기서 제 2과열기와 제 3과열기에는 과열 저감기가 있어 증기의 온도를 조절한다. 고압 터빈(HPT, high pressure turbine)을 통과한 증기는 재열기(RH, reheater)를 통과하면서 다시 에너지를 얻어 나머지 터빈 단계에 공급된다. 공기는 강압 통풍기(FDF, forced draft fan)에 의해서 주입되어 공기 예열기(AH, air heater)에서 예열된 후에 노(furnace)로 공급된다. 계속해서 노의 버너에 의해 고온의 연소가스가 된 후 보일러를 거치는 동안 여러 과열기들에게 열을 공급하고 마지막으로 드럼에 공급되는 물과 외부에서 주입되는 차거운 공기를 예열한 후에 유인 통풍기(IDF, induced draft fan)를 통해 외부로 방출된다.

### 2.2 정지 개요

정지는 급전 지령소에서 내려지는 급전 명령에 의해 발전을 중지하기 위하여 자동으로 운전되고 있는 정상 운전 상태에서 부터 부하 감발을 시작하여 전력의 공급을 중단하기 위한 과도기적 작업이다. 이러한 정지 운전은 배전반이라는 제

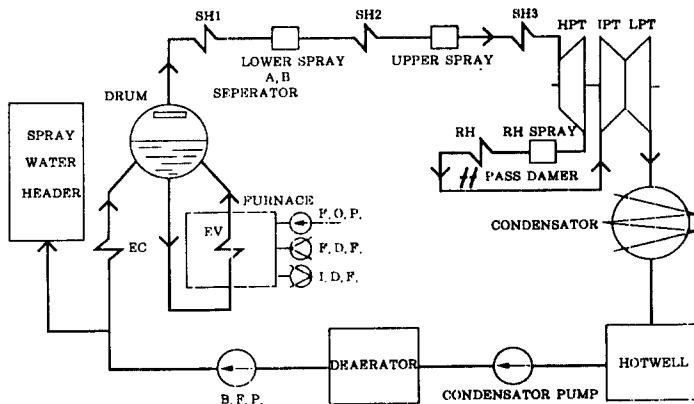


그림 1. 서울 화력 발전소 4호기의 블럭도

어실에 설치된 여러 장치들로 부터 공정치들을 관측하고 운전원들이 자신의 경험에 비추어 수동 조작으로 이루어지므로, 숙련된 운전원일수록 더 효과적인 운전을 하게 된다.

이러한 정지는 목적에 따라서 여러 방법이 있지만 여기서는 단기간 정지(또는 자연 냉각 정지)를 고려하겠다. 이 단기간 정지는 bottle-up상태를 유지시키는 운전으로 보일러가 소화된 즉시 연소공기의 공급과 증기 소비를 완전히 중단하고 일정한 증기 압력을 유지하다가 필요시에 단기간내에 보일러와 터빈을 재기동할 수 있는 상태를 말한다.

보일러에 무리를 주지 않고 정지를 하기 위해서는 여러 조건을 고려해야 한다. 아주 중요한 고려 조건들은 다음과 같다. 먼저 정지 운전 중에는 부하 감발률은 1.5 MW/min으로, 드로틀 압력의 감소율은 1kg/cm<sup>2</sup>/min으로 유지하여야 한다. 계통 병해 작업을 위한 조건으로 드로틀 압력은 90kg/cm<sup>2</sup>, 제 3과열기와 재열기의 증기 온도는 480 °C 그리고 급전 정지 명령 시간의 전후 5분 이내등이다. 이러한 조건들을 만족시키기 위해서 운전원들은 경험에 비추어 보일러를 운전한다. 대상 시스템인 서울 화력 4호기에 대한 자연 냉각 정지 절차가 그림 2에 나타나 있다.

### 2.3 checkpoint의 개념 및 선정

가장 최근의 정지와 기동의 제어 방법은 전체 과정을 몇개의 부과정들로 구분한 후 이 각각의 부과정들을 차례로 제어하는데 시퀀셜 논리와 부분적으로 연속형 제어기 모듈들과 여러 상황 판단에 간단한 전문가 시스템을 이용하고 있다. 그러나 비록 운전원들의 직접적인 수동 조작은 없을지라도 보일러의 여러 복잡한 특성이나 센서의 부정확성등에 의한 영향에 의해서 다음 차례를 수행하기 위한 조건들의 결정에 영향을 미치게 되고 보일러의 다른 특성의 발생등으로 인하여 운전원

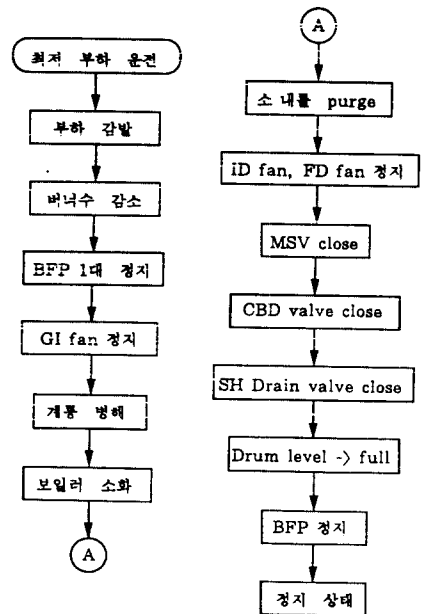


그림 2. 자연 냉각 정지 절차 (Bottle-up 운전)

들은 이를 감시하고 어떤 결정에 있어서 운전원들의 검사 및 판단이 개입하고 있다. 이와 같은 어려운 점들을 극복하기 위해서 전체 제어 과정들을 여러개의 부과정들로 구분하고 퍼지 논리를 이용하여 이 부과정들을 각각 독립적으로 제어하는 방법을 설명하겠다.

나누어진 각각의 부과정들의 제어는 현재의 부과정의 초기 조건으로부터 다음에 수행될 부과정을 수행하기 위해 요구되는 초기 조건으로 제어하는 것을 의미한다. 각 부과정들의 끝 부분에는 checkpoint라는 시점을 두어 다음 부과정들의 수행 가능 여부를 판단하여 초기 조건이 만족되면 다음 부과정의 제어로 넘어가고 그렇지 않으면 현재의 제어를 계속한다. 이 checkpoint는 부과정들 사이의 경계를 의미하며 이러한 방법은 그림 3에 나타나 있다. 즉, 부과정에서는 조건 1의 상태에 있는 시스템을 조건 2의 상태가 되도록 제어하기 위해 그 부과정에서만 이용되는 부제어기들을 사용한다.

그러나 발전소와 같은 복잡한 시스템을 다루는 경우 측정된 데이터의 부정확성과 측정 데이터 수의 한계등으로 인하여 그 초기 조건을 정확하게 맞추는 것이 거의 불가능하다. 따라서 어떤 상황이면 다음 부과정의 수행이 가능한가를 판단하는 판단자는 분명한 어떤 조건에 의해 정확하게 표시될 수 없다. 그래서 여기서는 이러한 판단을 위해서 수집된 정보의 부정확성, 발전소 상태의 변화등과 같은 상황에 잘 대처하고 있는 운전원들의 지식을 수집하여 퍼지니스를 이용한 구성을 할 수 있다. 이것은 곧 운전원들이 내리는 판단을 모사하는 것으로 그림 4에 이러한 방법의 예가 나타나 있다. 그림 3에서 수동으로 전력을 감소시키는 작업은 운전원 또는 기타 부제어기들

이 한다. 이 부과정의 끝부분에서 계통 병해라는 작업을 통해 다음 부과정으로 넘어가야 하며 계통병해에는 조건이 있어서 이것의 만족여부를 판단하여야 한다. 기존의 경우는 (b)에서 처럼 이것을 전문가 시스템과 같은 확립화된 조건으로 판단하지만 운전원들의 좀 더 지능적인 판단을 모사하여 (c)에서 보여처럼 퍼지 판단자에 의해 구성될 수 있음을 보이고 있다.

그러면 정지에 대해 checkpoint를 선정하기 위해서는 전체 정지과정을 부과정별로 나누어야 한다. 이것은 일괄적인 작업들, 큰 부시스템, 또는 어떤 중요한 동작들을 기준으로 해서 나누어진다. 먼저 정상운전으로부터 수동 운전으로 전환되는 때(최대 부하의 약 30%)까지 부하를 감발시키는 과정(subprocess 1), 수동운전에 의해 전력 공급을 중단하고 계통병해까지의 두번째 부하감발 과정(subprocess 2), 계통병해가 된 후 보일러의 여러 부시스템들을 정지시키는 과정(subprocess 3), 그 후 보일러의 상태를 점검할 목적으로 행하는 bottle-up 운전 과정(subprocess 4), 다음으로 강제 냉각을 시키거나 자연냉각을 시키는 과정(subprocess 5)으로 정지과정을 세분할 수 있다. 여기서는 이 각각의 분류된 과정들 사이의 전환 시점을 checkpoint로 설정한다. 그러므로 각각의 부과정들은 초기조건 문제를 제외하고는 독립적으로 생각할 수 있다.

### 3. 퍼지 제어기의 구성

정상 운전에서 정지를 위해 자동 제어로 부하의 감발이 시

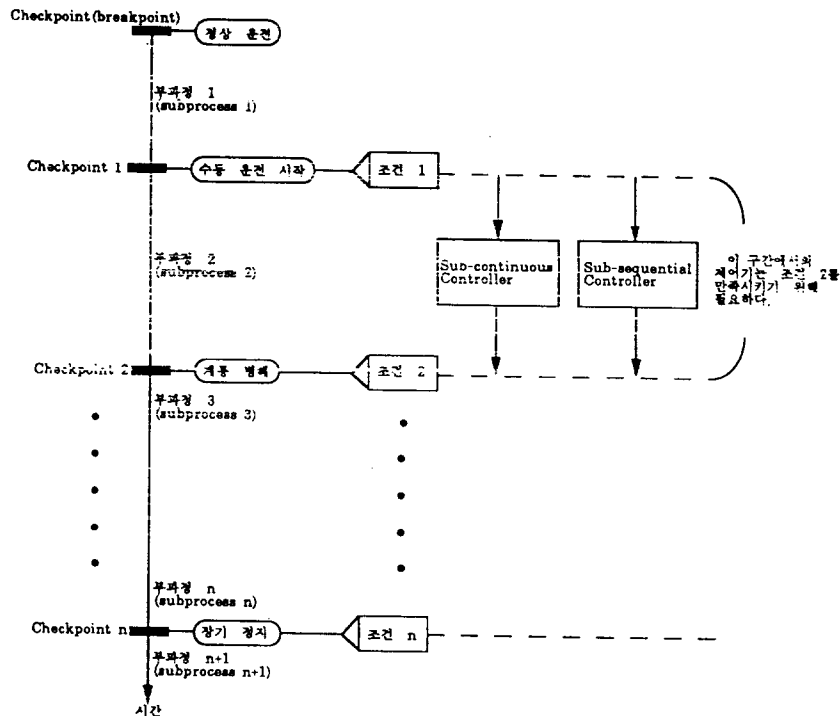


그림 3. Checkpoint의 개념

작되어 수동운전으로 전환되면 이때부터 운전원들은 보일러의 상태가 계통 병해 조건 즉, 다음에 수행될 부과정의 초기조건에 만족되도록 유의하여 보일러의 정지 운전을 한다. 이때 보일러에 무리를 주지 않는 범위로 보일러를 제어하면서 급전지령소에서의 정지 명령 시간을 잘 맞추기 위한 노력이 필요하다. 이 제어 과정에서 운전원들은 과도적 운전으로 인해 발생하는 드림의 수위 변화를 억제하기 위한 조작과 병해 조건에 맞추기 위한 주증기 압력, 과열기와 재열기의 온도 제어를 한다. 여기서는 드림 수위와 주증기 압력을 위한 제어기와 계통을 병해해도 되는가를 판단하는 계통병해 판단자를 소개한다.

구성된 퍼지 제어기는 퍼지화기(fuzzifier), 퍼지 추론기(fuzzy reasoning machine), 비퍼지화기(defuzzifier)의 3부분으로 구성된다. 여기서 퍼지화에는 퍼지 싱글톤(fuzzy singleton)과 선형 양자화 방법을 사용하였다. 퍼지 추론에는 가장 널리 사용되고 있는 Max-Min방법을 사용하였으며 비 퍼지화에는 면적 중심법(center of gravity)을 사용하였다. 규칙의 수집은 발전소의 정지 과정을 견학하여 운전원들의 행동을 관찰하거나 인터뷰와 정지의 기록된 운전 데이터들을 분석함으로써 이루어 졌다. 소속 함수는 다분히 주관적이 요소가

많았지만 universe of discourse의 선정등은 실제 공정에서의 가능한 값을 사용하였다.

### 3.1 드림 수위 제어기

부하가 감발함에 따라 주증기의 소모가 적어지고 또한 연료의 감소등과 수위의 shrink-swell현상등으로 인해 수위는 변동을 나타나게 되고 특히 수동 운전되는 부하 감발 중에는 수위의 변동이 생기며 운전원은 이를 감시하고 급수 밸브를 조작하여 수위를 0으로 일정하게 유지시킨다. 그림 5은 수위 제어를 위한 규칙과 소속함수가 나타나 있다. 드림 수위는 0의 주변을 비교적 정밀히 제어하고 주변으로 갈수록 대략적으로 제어하기 위해서 소속함수를 비대칭적으로 정하였다. 수위의 변화량에 대해서는 universe of discourse내에서는 거의 발생할 가능성이 비슷하므로 똑같은 중요도로 표시되어야 하며 그래서 대칭인 소속함수를 사용하였다. 이러한 수위의 상태에 따른 밸브의 조정량도 똑같은 중요도로 표시되어야 하므로 대칭인 소속함수를 사용하였다. 규칙은 수위가 높을 경우 또는 수위의 변화가 양(+)으로 클 경우는 밸브를 열고 수위가 낮은 경우 또는 수위의 변화가 음(-)으로 클 경우는 밸브를 닫는 것을 나타내며 이러한 현재의 수위와 수위의 변화량에 대해서 조정해야 하는 밸브의 변화량을 나타낸다.

### 3.2 주증기 압력 제어기

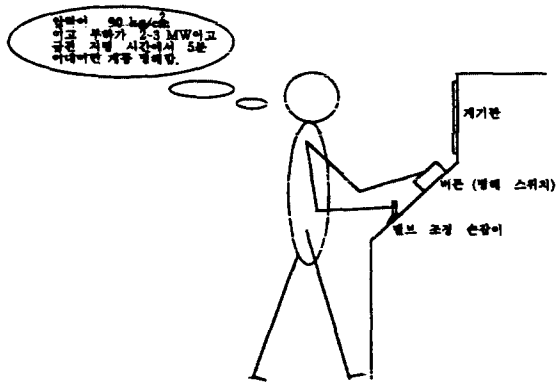
보일러와 터빈에 무리를 주지 않는 범위내에서 병해로 하기 위해서는 주증기의 압력을 가급적 90 kg/cm<sup>2</sup>을 유지하여야 한다. 이 압력의 제어는 연료 밸브를 조정하기 위해서 드로틀 압력을 주로 관찰하므로 퍼지 제어기의 입력 변수는 드로틀 압력이 된다. 그림 6은 이 제어기를 위한 규칙과 소속함수를 보여주고 있다. 압력에 대해서는 각 universe of discourse내에서의 값의 중요도가 비슷하여 대칭적인 소속함수로 모두 정하였다. 입력은 현재 압력과 설정치(여기서는 90 kg/cm<sup>2</sup>)와의 차와 압력이 변화량이다. 이것에 따른 밸브의 조정량이 규칙으로 표시되어 있다. 압력이 높을 경우 또는 그 변화율이 클 경우는 연료 밸브를 닫고 압력이 낮은 경우 또는 그 변화율이 작을 경우는 연료 밸브를 연다.

### 3.3 병해 판단자

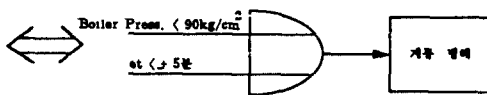
여러 퍼지 논리 제어기에 의해 보일러는 원하는 병해 조건이 만족되도록 제어되고 이 부과정의 마지막에서 다음 부과정으로 넘어가도 되는가를 판단받게 된다. 그러나 발전소의 보일러와 같은 비선형적이고 시변 특성을 가진 시스템이 항상 같은 상태로 제어가 되지는 않는다. 여기서 일반적인 엄밀하고 확실적인 조건에 의해 판단을 내리는 판단자가 구성된다면 병해를 해야 하는 시점인데도 불구하고 조건의 만족만 요구하다 시기를 놓쳐 중대한 실수를 야기할 수도 있다. 그래서 운전원들이 생각하는 판단기준을 그대로 표현할 수 있는 퍼지 논리를 이용하여 판단자를 구성함으로써 보다 지능적인 판단을 기대할 수 있다. 여기서의 계통 병해 판단자는 운전원들의 지식을 이용하여 앞의 추론 방법을 그대로 사용하여 구성하였다. 즉, 운전원들은 다음과 같은 언어적인 생각을 한다.

예를 들면,

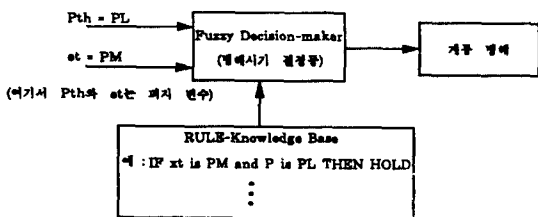
만약 현재 시간이 병해 명령 시간보다 조금 늦고



(a) checkpoint 2의 목적



(b) 기존의 시현실 논리에 의한 방법



(c) 운전원의 판단을 모사하기 위해 퍼지 판단기를 도입한 방법

그림 4. 그림 3의 부과정 2의 경우에 대한 실제

L	xL	xBFP
ZO	ZO	ZO
NS	PS	ZO
PS	NS	ZO
ZO	PB	NB
ZO	PS	NB
PB	PB	NB
NS	ZO	PS
NS	NS	PS
ZO	NS	PS
ZO	NB	PB
NS	NB	PB
PS	PS	NS
PS	ZO	NS

$$xL = L - L_{last}$$

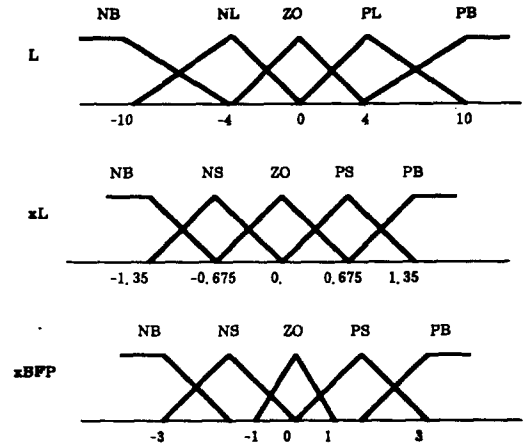


그림 5. 드럼 수위 제어를 위한 규칙과 소속함수

ePth	xPth	xOIL
PS	PB	NB
ZO	PB	NB
PS	PS	NM
ZO	PS	NM
NS	PS	ZO
PS	ZO	NS
ZO	ZO	ZO
NS	ZO	PS
PS	NS	ZO
ZO	NS	PS
NS	NS	PB
PS	NB	PS
ZO	NB	PB

$$ePth = Pth - Pth_{set}$$

$$xPth = Pth - Pth_{last}$$

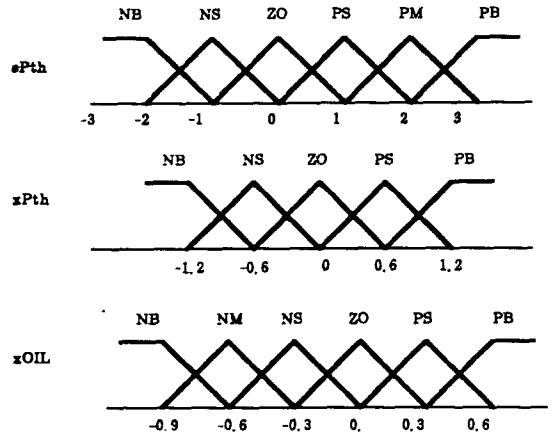


그림 6. 주증기 압력 제어를 위한 규칙과 소속함수

et	ePth	eTfo	eTrh	LineOff
NS	ZO	PS	PS	PS
NS	ZO	PB	ZO	ZO
NS	PB	ZO	PS	PB
ZO	NB	ZO	ZO	PB
ZO	ZO	ZO	ZO	PB
ZO	ZO	PS	PS	PM
ZO	PB	ZO	ZO	PM
PS	ZO	ZO	ZO	PB
PS	PB	ZO	ZO	PM
PS	PS	NS	NS	PB
PB	PB	NS	NS	PB
PB	ZO	NS	NS	PB

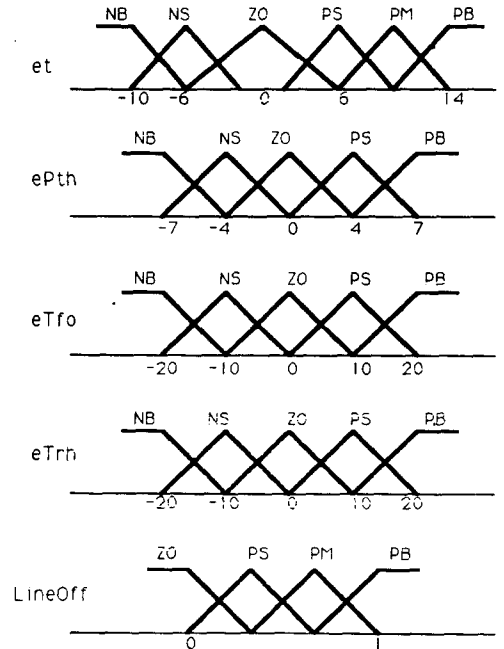
et = current time  
- expected lineoff time

$$ePth = Pth - 90$$

$$eTfo = Tfo - 480$$

$$eTrh = Trh - 480$$

그림 7. 병해 판단을 위한 규칙과 소속함수



드로를 압력이  $90\text{kg/cm}^2$  보다 비교적 크며 제 3 과열기와 재열기의 온도가  $480^\circ\text{C}$ 에 매우 가까우면 그러면 계통병해를 시키야 한다는 확신도가 0.7

-> IF et = PS & ePth = PB & eTfo = ZO & eTrh = ZO  
THEN LineOff = PM

이렇게 구체적인 운전원들의 생각과 판단을 퍼지 논리를 이용하여 묘사할 수 있으며 여기서는 병해 결정의 확신도를 갖는 소속함수를 두어서 일반적인 추론 방법을 그대로 사용하였다. 그래서 나온 값을 적당한 경계치(threshold)를 중심으로 해서 결정을 내릴 수 있다. 이 경계치는 매우 주관적인 값으로 운전원마다 다르며 여기서는 모델과의 실험에서 추정하였다. 그림 8은 이 판단자를 위한 규칙과 소속함수를 보여주고 있다. 규칙에서는 현재 시간과 계통 병해 명령 시간과의 차, 드로를 압력과 설정치와의 차, 제 3과열기와 재열기의 온도와 설정치와의 차가 입력변수로 사용되며 출력 변수는 그에 따른 계통병해의 확신도를 나타낸다. 그래서 규칙은 계통 병해 조건에 현재 시간과 보일러의 상태가 어느 정도 가까우냐에 따른 병해의 확신도를 나타낸다. et의 소속함수에서  $90\text{kg/cm}^2$ 에 아주 가까운 ZO의 경우는 계통 병해 명령 시간보다 수분이내를 나타내며 et에 관련된 다른 규칙과의 합성이 아닌 이 규칙만을 사용하기 위하여 그림 7(a)와 같이 정하였고 그 외는 대칭적인 소속함수를 사용하였다. 이 외에 다른 변수인 ePth, eTfo, eTrh 및 LineOff의 소속함수는 모두 대칭적으로 정하였다.

#### 4. 실험 및 결과 검토

##### 4.1 모의 실험

구성된 제어기를 발전소에 직접 적용하여 실험할 수는 없으므로 이 발전소의 드럼형 보일러에 대한 모델이 필요하다. 여기서 구성된 정지에 대한 모델은 신호 흐름도(signal flow diagram)를 이용하였다. 이 방법은 이미 정상 운전과 기동에 대한 모델 구성에 이용되어 그 유용성이 입증되었다[2][6].

모델의 계수는 여러 단계별로 부분적인 선형화(piecewise linearization)를 하였다. 전체 모델은 주증기, 열, 압력, 수위, 온도 동특성을 나타내는 모델과 그 외에 밸브, 댐퍼등의 부동특성을 나타내는 모델로 구성되며 그림 8에는 압력 동특

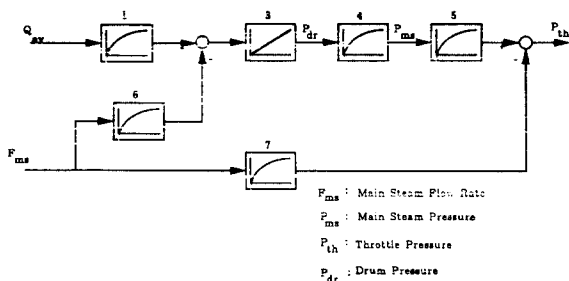


그림 8. 압력 동특성에 대한 신호 흐름도 모델

성에 대한 모델의 예가 나타나 있다. 계수의 추정은 외부 변수값, 제어 입력력값, 그리고 측정된 공정치들로부터 얻고 내부 변수의 경우는 통찰이나 모의 실험을 통해 추정하였다.

이미 소개한 바와 같이 여기서는 부하 감발시의 수동 운전 개시에서부터 계통 병해까지를 다루므로 전체 정지 과정에서 이 부분에 대해서만 모델링을 하였다. 모델의 초기 상태는 최대 전력 공급량의 1/3정도(50MW로 정하였음)의 운전상태이다. 이 상태에서부터 구성된 정지 모델을 이용하여 정지 제어를 수행한다.

모의 실험은 정상 운전되고 있는 상태에서 부하 감발을 하여 수동 운전으로 전환이 가능한 50MW에서 퍼지 제어를 결합하는 방법으로 수행하였다. 모델의 샘플링 시간은 0.25초로 하였고 퍼지 제어기의 샘플링 시간은 운전원들의 평균 제어 간격을 고려하여 압력의 제어일 경우는 1분, 수위의 제어에 대해서는 2분, 그리고 히터의 온도를 제어하는 경우는 3분으로 정하고 모의 실험을 하였다.

##### 4.2 결과 검토

앞에서 구성된 모델과 퍼지 제어기와의 결합 시뮬레이션 결과가 그림 9에 나타나 있다. 여기서 시간은 40분에서 100분까지를 표시하였으며 45분부터 부하 감발을 시작하여 약 71분에서 자동제어 운전은 퍼지 제어로 바뀌었다. 그리고 실제의 경우는 약 87분에서 계통병해가 일어났음을 미리 밝혀준다. (a)는 입력으로 사용된 주증기 흐름으로 실제 서울 화력의 값으로 이것은 전력과 같은것으로 생각하면 된다. (b)는 연료 제어 밸브의 변화를 나타내고 (c)는 급수 제어 밸브의 변화를 나타낸다. 이것들은 제어 입력으로 퍼지 제어기의 출력값들이다. 그에 따른 연료량과 급수량이 (d), (e)에 나타나 있다. 여기서 실선들은 퍼지 제어기의 역할로 인한 제어 결과이고 점선들은 실제 운전값이다. (f)는 이러한 입력에 대한 드럼의 수위 특성을 나타낸다. 실제 운전보다 0에 더 가까이 운전됨을 알 수 있다. (g)와 (h)는 주증기 압력과 드로를 압력을 나타낸다. 드로를 압력을 유심히 보면  $90\text{kg/cm}^2$ 을 유지하고 있는 것을 알 수 있다. 시간이 약 90분을 초과하면 계통 병해가 일어난 상황이므로 이 모델은 더이상 맞지 않기 때문에 끝부분에서는 각 곡선이 상당한 차이를 보이고 있다.

그림 10은 그림 9의 경우에 대한 계통 병해 판단자가 잘 동작하고 있는 것을 보여주는 것으로 가로축은 시간의 1분을 나타낸다. 이 경우에 0.6이상의 확신도를 나타내는 것을 높은 확신도로 생각하면 위의 경우에는 86분으로 이 이후에 계통 병해가 일어날 수 있는 높은 확신을 주고 있다. 실제로 운전원들에 의한 병해 판정은 87분에서 일어났으므로 별로 차이가 없이 그때의 보일러 상태에 따른 비슷한 판정을 내릴 것을 알 수 있다.

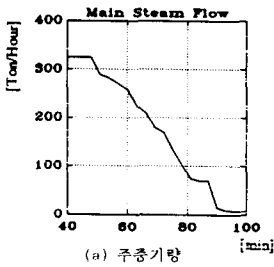
이상의 모의 실험을 통하여 퍼지 제어기가 이 부과정을 잘 제어하고 퍼지 판단자가 병해 조건에 가까워 졌을 때에 높은 확신도를 나타내는 것을 보였다.

#### 5. 결론 및 추후 연구 과제

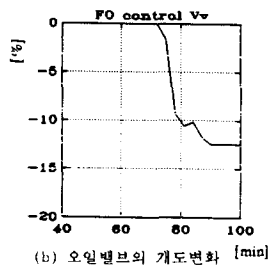
이 논문에서는 화력 발전소의 보일러 정지를 자동화하기 위하여 전체 정지 과정을 여러개의 부과정들로 구분하고 여기

에 checkpoint라는 것의 도입과 퍼지 논리를 사용하여 기존의 시퀀셜 논리에 의한 제어 보다 정지를 효과적으로 할 수 있는 방법을 소개하였다. 또한 이것을 보이기 위해 퍼지 제어기와 퍼지 판단자를 구성하였으며 따로 구성된 정지 모델과 모의 실험하여 그 가능성을 보였다.

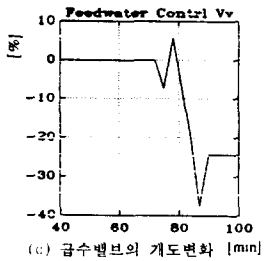
비록 여기서는 전체 시스템의 일부인 드럼형 보일러만을 다루었지만 퍼지 논리가 발전소와 같은 복잡한 특성을 갖는 일반적인 다른 공정 시스템에 대한 자동화에도 훌륭한 방법으로 쓰일 수 있다. 또한 여기서는 정지중에서도 수동 운전에 의해 부하 감발을 하는 정지의 일부분만을 연구하였으나 이 방법은 쉽게 확장이 가능하다. 따라서 앞으로는 checkpoint라는 것의 선정과 운전원동의 판단을 모사하는 판단자의 구성을 통해 복잡한 과정의 제어가 보다 용이하고 조직적으로 이루어 지리라 믿는다.



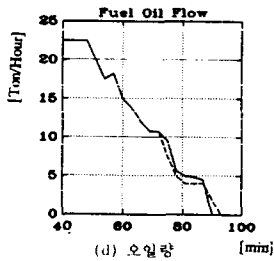
(a) 주증기량



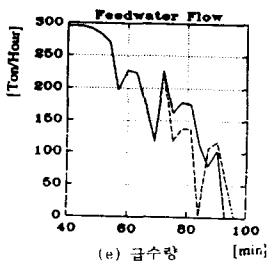
(b) 오일밸브의 개도변화



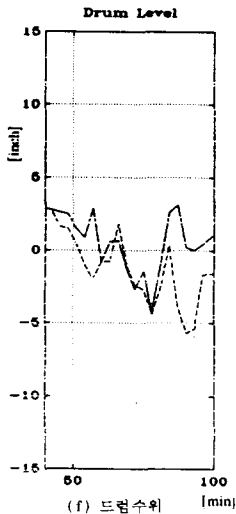
(c) 급수밸브의 개도변화



(d) 오일량



(e) 급수량



(f) 드럼수위

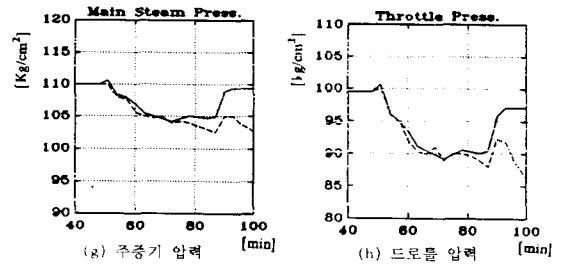


그림 9. 퍼지 제어기와와의 결합 실험

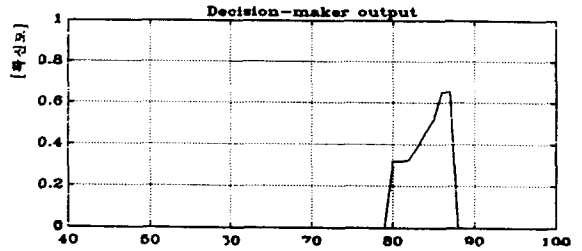


그림 10. 계통 병해 판단자의 출력

참고 문헌

- [1] Dukelow, S.G., "Boiler Controls - Yesterday, Today, and Tomorrow", COMBUSTION, November 1977.
- [2] 류 형근, "퍼지 논리를 이용한 드럼형 보일러의 자동 기동에 관한 연구", 한국 과학 기술원 석사 학위 논문, 1991.
- [3] 이 한오, "퍼지 논리를 이용한 드럼형 보일러의 자동 정지에 관한 연구", 한국 과학 기술원 석사 학위 논문, 1992.
- [4] John A. Bernard, "Use of a Rule-Based System for Process Control", IEEE Control Systems Magazine, Oct., 1988.
- [5] P.M.Larsen, "Process Applications of Fuzzy Logic Control", Int. Journal of Man-Machine Studies, Vol.12, 1980.
- [6] 김 재선, "신호흐름도 모델을 이용한 화력 발전소 드럼형 보일러 시뮬레이터의 개발에 관한 연구", 한국 과학 기술원 석사학위 논문, 1990.
- [7] Mamdani, E.H., Assilian, S., "An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller", Int Journal of Man-Machine Studies, Vol.7., 1984.
- [8] Günter Klefenz, "Automatic Control of Steam Power Plants", Hartmann & Braun AG, Minden, Bibliographisches Institute, Zurich, 1986.
- [9] C.C.Lee, "Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller - part I, II", IEEE Trans., on SVC, Vol.20, No.2, March/April, 1990.