

論文94-31B-10-6

화력 발전소 드럼형 보일러 시스템의 고장 진단을 위한 퍼지 전문가 시스템의 개발

(Development of Fuzzy Expert System for Fault Diagnosis in a Drum-type Boiler System of Fossil Power Plant)

邊昇炫*, 朴世華** , 卞增男**

(S. H. Byun, S.-H. Park and Zeungnam Bien)

要約

이 논문에서는 화력발전소 드럼형 보일러의 고장 진단을 위한 퍼지 전문가 시스템을 개발하였다. 개발되어진 퍼지 전문가 시스템은 지식 베이스, 퍼지화 부분, 지식 베이스 처리 모듈, 지식 베이스 관리 모듈, 추론 엔진, 언어 근사 모듈로 구성되어진다. 퍼지 전문가 시스템의 목적은 드럼수위를 포함하는 시스템의 상태를 분석하고, 급수량 센서 고장, 급수 제어 밸브 고장, water wall 튜브 파열등의 고장을 감지하는 것이다. 퍼지 전문가 시스템은 공정 값과 제어기 출력값, 그리고 전문가와의 인터뷰와 설문조사를 통해 구축한 지식베이스를 이용해서 고장을 진단한다. 서울화력 4호기 보일러 시스템 디지털 시뮬레이터를 이용한 실험을 통해 퍼지 전문가 시스템의 효용성을 보인다.

Abstract

In this paper, a fuzzy expert system is developed for fault diagnosis of a drum-type boiler system in fossil power plants. The developed fuzzy expert system is composed of knowledge base, fuzzification module, knowledge base process module, knowledge base management module, inference module, and linguistic approximation module. The main objective of the fuzzy expert system is to check the states of the system including the drum level and detect faults such as the feedwater flow sensor fault, feedwater flow control valve fault, and water wall tube rupture. The fuzzy expert system diagnoses faults using process values, manipulated values, and knowledge base which is built via interviews and questionnaires with the experts on the plant operations. Finally, the validity of the developed fuzzy expert system is shown via experiments using the digital simulator for boiler system in Seoul Power Plant Unit 4.

1. 서론

*準會員, **正會員 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., KAIST)

接受日字 : 1994年 2月 12日

한 나라의 기간 산업으로서 중요한 역할을 차지하는 전력 산업은 사회의 발전과 더불어 증가되는 전력

소비량과 양질의 전력 요구에 의해 지속적으로 발전되어 왔다. 전력 수요에 대해서 양질의 전력을 안정적으로 공급하기 위해서는 발전소를 고장없이 효율적으로 운용하는 것이 매우 중요하다. 발전소에 예기치 못한 고장이 발생하여 운전이 멈추게 되면 사회적 경제적인 손실은 상당히 크다. 따라서 고장의 발생을 억제하고, 예방함이 우선되어야 하지만 완전히 피할 수 있는 것이 아니므로 미리 고장의 가능성을 예측하고, 고장에 대한 원인을 찾아 내는 고장 진단이 중요한 문제로 대두되고 있다.^{[1][2]}

한편, 우리나라의 경우 화력 발전은 수요 변동에 의한 변동 부하를 추종하도록 운전되고 있으며 운전 상태의 변화에 따른 보다 능동적인 운용이 중요하다. 능동적인 운용이 요구되는 화력 발전소 제어의 중요성이 최근에 높게 인식되고 있을 뿐만 아니라, 오래전부터 경제적, 기술적, 안정적 그리고 적응 요구에 따라 보일러의 설계기법과 개선되어진 제어기법이 결합되면서 보일러 제어 시스템은 많은 발전을 해왔다. 화력 발전에서 천연에너지를 열에너지로 변환해서 터빈에 일정한 압력과 온도의 증기를 공급하는 보일러 시스템의 효과적인 운용은 특히 중요하므로 보일러 시스템의 고장시 이에 대한 효과적인 고장 진단이 요구된다.^{[1][2]}

여기서 고장이라 함은 일반적으로 보일러의 트립(정지) 등으로 인한 발전소의 정지는 물론, 그런 정지 상태로 가기 전에 각 제어 루프, 기기 등의 상태의 이상을 알려주는 경보 장치를 통한 경보(alarm), 그리고 운전원의 공정 데이터에 근거해서 판단한 시스템 이상 등을 의미한다. 발전소 보일러 시스템은 운전반의 판넬을 통하여 운전원에 의해 제어되고 있고, 많은 감지기(sensor, transmitter)와 구동기(actuator)를 가지고 있으며, 발전소의 서브 시스템이므로 발전소 전체 시스템의 운전 상황에 의해서도 영향을 받는다. 이런 점을 토대로 고장의 요인을 살펴 보면 보일러 플랜트 고장, 감지기 고장, 구동기 고장, 제어기 고장, 전기 사고, 제어기 오조작, 기타로 구분할 수 있다. 이들 고장의 요인 각각에 대해 설명을 하면, 먼저 플랜트 고장은 보일러 드럼에 급수를 공급하는 튜브가 파열되는 경우 등의 플랜트 자체 고장을 말하며, 감지기 고장은 실제의 공정 데이터에 대해 오프셋 형태의 오차를 가지는 감지기의 고장을 말한다. 구동기 고장은 제어 밸브 등의 구동기가 제어 출력값에 관계없이 어느 지점에 고정되는 고장을 말하며, 제어기 고장은 제어를 담당하는 제어 카드의 소자 고장 등으로 발생하는 제어기 고장을 말한다. 전기 사고는 제어기나 기타 기기에 공급되는

전원이 나가는 고장 발생을 의미하며, 제어기 오조작은 제어를 담당하는 운전원의 조작 미숙으로 인한 고장을 말한다.

이렇듯 발전소 보일러 시스템의 고장의 발생 요인이 많고, 각 요인에 대한 경우의 수가 아주 많음으로 해서 고장 발생시 고장 추적이 어렵고, 전문 운전원도 고장을 찾는데 많은 시간이 소요되기도 한다. 따라서 부하 변동을 기민하게 추종해야 하는 화력 발전의 효과적인 운용을 위해서는 앞에서 언급한 넓은 의미에서의 고장(시스템 이상) 여부를 판별하고 고장 부위를 찾아 주는 고장 진단 시스템의 개발이 요구된다고 볼 수 있다.^[1]

한편, 발전소 보일러 시스템처럼 대규모 시스템의 경우 열역학 법칙 등을 이용하거나 계수 추정, 실험에 의한 수학적 모델을 구하기가 어려움으로 해서 모델링에 근거한 해석적 고장 진단이 어렵다고 할 수 있다. 현재 발전소에서의 고장 진단은 수학적 모델링을 잘 모르지만 현장에서의 다년간의 경험과 지식을 가지고 있는 숙련된 전문가에 의해서 행해지고 있다. 따라서 고장 진단 시스템의 개발을 위해서는 숙련된 전문가의 경험과 지식에 근거한 전문가 시스템을 이용하는 게 바람직하다고 볼 수 있다.^[1]

전문가 시스템은 전문가를 대신해 전문가 역할을 하는 응용 프로그램으로 전문가의 지식을 지식 베이스의 형태로 저장하여 사용자가 원하는 정보를 추론기관을 통해 추론해 내는 지식 기반 시스템이다[3] 전문가 시스템에서 지식 베이스로 활용되는 전문가의 지식은 일반적으로 정량적이 아닌 언어적인 표현에 의존하므로, 지식에 불확실성이 내포되고 표현 용어 자체에 애매함이 포함될 수 있다. 따라서 지식 용어 자체의 애매함을 다루기 위해서 애매함을 잘 나타낼 수 있는 퍼지 집합을 이용하여 전문가의 지식을 일반적으로 이용하는 "IF- THEN-"형식의 규칙에 의해 표현하고, 지식의 불확실성 처리 방안으로 퍼지 논리를 이용하여 퍼지 집합으로 표현된 지식을 처리할 수 있는 전문가 시스템의 개발이 적합하다[4] 따라서 본 논문에서는 퍼지 집합과 퍼지 논리를 이용한 퍼지 전문가 시스템을 개발해서 보일러 시스템의 이상(고장) 여부를 알려 주고, 고장의 부위(원인)을 알려주는 고장 진단 시스템을 구축하고, 발전소 보일러 시스템의 중요한 부시스템인 드럼 수위 루프를 중심으로 적용 가능성을 보이고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제1장의 서론에 이어, 제2장에서는 대상 시스템인 화력 발전소 시스템의 개요, 드럼 수위 루프에 대해 기술하고, 제3장에서는 발전소 보일러 시스템 고장 진단을 위한 퍼지

전문가 시스템의 개발의 필요성에 대해서 살펴 보고, 구성된 퍼지 전문가 시스템에 대해서 설명한다. 제4장에서는 드럼 수위 루프의 고장 진단을 위한 지식 베이스를 구축하고, 구축된 지식 베이스를 이용해서 고장에 대한 모의 실험을 함으로써 고장 진단 퍼지 전문가 시스템의 효용성을 보이고, 제5장에서는 본 논문의 연구 결과를 정리하고, 앞으로의 추후 연구과제를 기술한다.

II. 시스템 개요

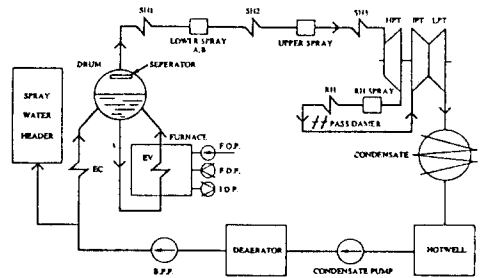
본 논문에서 대상으로 선정된 시스템은 서울화력 4호기이다. 이 발전소는 자연 순환식 드럼형 보일러를 갖는 중유 전소식 발전소로서 도심의 전력뿐 아니라 지역 난방을 위한 증기를 공급하고 있다. 서울화력 4호기의 사양은 다음과 같다.^[5]

- Maximum Power : 137.5 MW
- Maximum Steam Evaporation : 450 Ton/hr
- Steam Pressure : 126.6 Kg/cm²
- Steam Temperature : 540°C

대상 발전소인 서울화력 4호기의 자연 순환식 드럼형 보일러의 블록 선도는 그림 1에 나타나 있다. 보일러 급수 펌프(BFP, boiler feedwater pump)에 의해 물은 절탄기(EC, economizer)에서 예열된 후 드럼에 공급되고 일부는 과열 저장기(attemperator or spray)에 공급된다. 드럼에 공급된 물은 하강 급수관(downcomer tube)을 통해 노 하위 헤더(lower furnace wall header)에 모여 증발기에서 가열되어 상승하며 물과 수증기의 혼합체로 상승 급수관(riser)을 통해 노 상위 헤더(furnace upper header)로 모인 후 드럼으로 들어간다. 여기서 드럼은 증기 발생을 위한 관수의 저장 역할과 증발기를 거친 재순환된 물과 급수를 합쳐주는 혼합실 역할을 한다. 또한 드럼은 증기와 물을 서로 분리 시키는 역할도 하게 되는데 물은 중력에 의해 하부로 모이게 되고 상부에는 증기가 모여 있게 된다.

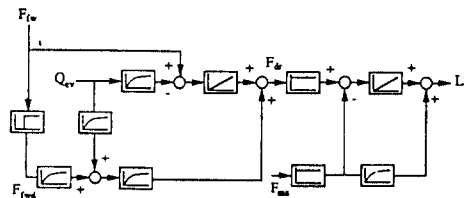
드럼 상부에 모이게 되는 증기는 HRA(Heat Recovery Area)를 통해 제1 과열기(SH1, 1st superheater)를 2개의 관으로 나뉘어 제2 과열기로 들어간다. 다음으로 제3 과열기를 거쳐 터빈에 공급된다. 여기서 제2 과열기와 제3 과열기는 과열 저장기가 있어 증기 온도를 조절한다. 고압 터빈(High Pressure Turbine)을 통과한 증기는 재열기(RH, ReHeater)를 통과하면서 다시 에너지를 얻어서 나머지 터빈 단에 공급되고 터빈을 거친 증기는 응축기

(condensator)에서 응축되어 hotwell에 고인다. 그 후 탈기기(deaerator)에서 증기가 분리된 후 물은 급수펌프에 의해 드럼에 다시 공급된다. 이처럼 드럼에서 hotwell까지는 증기, hotwell에서 드럼까지는 물의 형태로 에너지의 전달이 이루어지는 순환을 하도록 되어 있다. 공기는 강압 통풍기(FDF, Forced Draft Fan)에 의해서 주입되어 공기 예열기(AH, Air Heater)에서 예열된 후에 노(furnace)로 공급된다. 노로 공급된 공기는 노의 버너에 의해 고온의 연소가스(flue gas)가 되어 증발기에 열을 공급하여 급수를 증발시키고 각 과열기와 재열기를 가열한 다음 절탄기와 공기 예열기까지 예열한 후에 유인 통풍기(IDF, induced draft fan)를 통해 외부로 방출된다.^[5]



BFP : Boiler Feedwater Pump, EC : Economizer, EV : Evaporator
RH : Reheater, SH : Superheater, FDF : Forced Draft Fan
IDF : Induced Draft Fan, FOP : Fuel Oil Pump
HPT : High Pressure Turbine, IPT : Low Pressure Turbine
IPT : Intermediate Pressure Turbine

그림 1. 서울화력 4호기 보일러 블록선도
Fig 1. Block diagram of drum-type boiler in Seoul Power Plant Unit 4.



Ffw : Feedwater flow rate, Fwd : Delayed feedwater flow
Fms : Main steam flow rate, Fdr : Net feedwater flow rate into drum
Qev : Evaporator heat flow rate, L : Drum level

그림 2. 드럼 수위 동특성 신호 흐름도
Fig. 2. Signal flow diagram of drum level dynamics.

대상 시스템인 서울화력 4호기 발전소 보일러 플랜

트의 모델은 변수들 사이의 인과 관계를 기본적인 계산 응답의 결합체로 표현하는 신호 흐름도를 이용한 Klefenz의 보일러 모델[6]을 기본으로 하여 현장의 운전자에 의해 수시로 기록된 자료를 통해 각 블럭의 계수를 조정하여 모델링 된다.^[7] 보일러 모델은 제어기에 맞추어 여러 개의 부시스템으로 나누어 질 수 있는데 드럼 수위 동특성에 대한 신호 흐름도를 구성하면 그림 2와 같다.

드럼형 보일러 제어는 크게 주증기 압력 제어, 노내압 제어, 주증기 온도 제어, 급수 제어(드럼 수위 제어)로 나눌 수 있으며, 급수 제어는 증기량, 급수량, 드럼 수위를 제어기의 입력으로 이용하는 3요소 제어로서 보일러 드럼에 보내는 급수를 제어 한다. 전형적인 3요소 제어의 예가 그림 3에 나타나 있다. 급수 제어의 기능은 유출되는 증기량과 같은 급수량을 공급하고, 드럼 수위를 설정치에 일정하게 유지하는 것이다. 보일러에서 나가는 증기량은 급수 제어 밸브의 위치를 결정짓는 선행신호가 된다. 이 선행 신호와 드럼 수위의 설정치와 실제 드럼 수위와의 편차가 비례 적분된 값이 가산되어 급수량의 요구신호가 된다. 이 요구신호와 실제 급수량과의 편차가 비례 적분 동작 되어 급수 제어 밸브의 위치를 결정하게 된다. 그림 3의 제어 구조에서는 드럼 수위를 외란에 관계없이 항상 설정치로 유지하는 것이 제어의 목적이다.

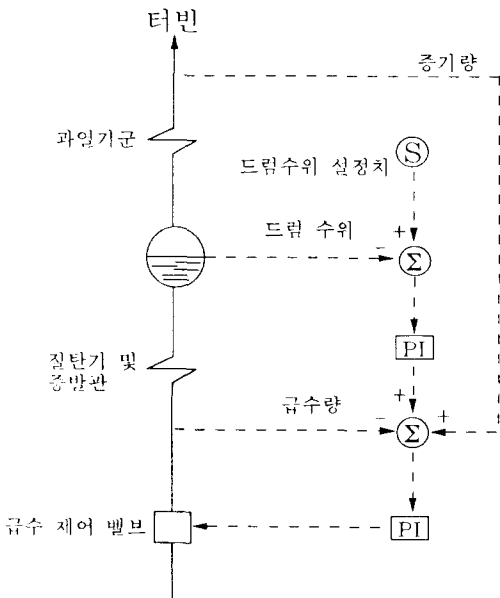


그림 3. 드럼 수위 제어기
Fig. 3. Drum level controller.

III. 보일러 시스템 고장 진단을 위한 퍼지 전문가 시스템

발전소 보일러 시스템의 고장 진단을 위해서는 공정 데이터를 입력으로 처리할 수 있는 퍼지 전문가 시스템이 요구되는데, 기존에 연구되거나^{[8][9]} 상품화되어 있는 퍼지 전문가 시스템 개발 도구^{[4][10]}는 입력으로 공정 데이터를 받아들일 수가 없으므로 다음과 같이 퍼지 전문가 시스템을 개발하고자 한다. 발전소 보일러 시스템 고장 진단 퍼지 전문가 시스템은 공정 데이터의 퍼지화 기능을 가져야 하며, 그에 따라 지식 베이스에서 부가적인 정보를 필요로 한다. 그리고 고장 진단 지식의 침착이 필요하므로 지식 베이스의 수정이 용이하도록 고장 진단 퍼지 전문가 시스템을 구성하는 것이 요구된다.

지식 베이스의 추론부와외의 분리와 공정 데이터를 받아 들여 퍼지화하는 기능, 그리고 추론된 고장 진단 정보를 사용자가 이해할 수 있게끔 하는 기능들을 고려해서 구성한 퍼지 전문가 시스템의 구성도는 그림 4와 같다.

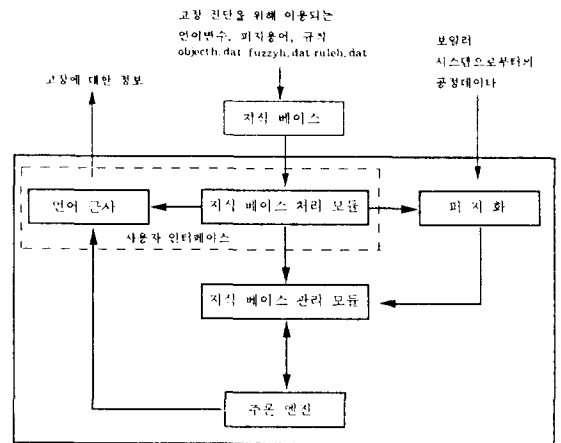


그림 4. 고장 진단용 퍼지 전문가 시스템의 구성
Fig. 4. Configuration of fuzzy expert system for fault diagnosis.

1) 퍼지화

퍼지 전문가 시스템에서 공정 데이터를 이용하기 위해 공정 데이터를 퍼지화한다. 즉, 읽어들이는 공정 데이터를 미리 정해 놓은 입력 퍼지 변수의 전체 집합으로 바꾸어 준다.

2) 지식 베이스

지식 베이스는 사용자의 접근이 용이하도록 추론부와 분리되어 있으며, 고장 진단을 위해 이용되는 지식들을 제공한다. 고장 진단 지식을 표현하는 지식 표현 방법으로 가장 많이 이용되는 방법으로서 지식의 수정이 용이한 전진부(antecedent)와 후진부(consequent)로 구성되는 규칙에 의한 표현 방법을 이용하였다. 본 논문에서 구성한 퍼지 전문가 시스템의 지식 베이스는 공정 데이터를 나타내는 변수와 고장 진단을 위해 필요한 변수 그리고 공정 데이터가 가지는 I/O address를 알려 주는 객체 베이스와, 객체 베이스에서 정의된 변수가 가질 수 있는 퍼지 용어와 퍼지화에 필요한 정보를 갖는 퍼지 베이스, 그리고 객체 베이스와 퍼지 베이스에서 정의된 변수와 퍼지 용어로 구성된 규칙 베이스로 구성된다.

(1) 규칙 베이스

규칙 베이스는 전진부와 후진부로 이루어진 생성 규칙의 나열로서 구성되어진다. 전진부는 다중 명제들이 AND와 OR의 논리 연산자로 연결되어 형성되고, 후진부는 단일 명제로 구성된다. 그리고 규칙들간의 구별을 위한 규칙의 고유번호와 규칙의 확신도(certainty factor)를 요구한다. 규칙 베이스의 표현 양식은 그림 5와 같다.

```
{ Rulename : rulenum / * 규칙의 고유성을 나타내는 정수형의 숫자 * /
( 조건 명제 1 AND (OR)
조건 명제 2 OR (AND)
.....
조건 명제 N )
-->
( 후진 명제 )
Certainty : certaintyfactor / * 규칙의 확신도(certainty factor)로써 정수형의 숫자 * /
Description : 확신도로 certaintyfactor를 가지며 rulenum에 의해 구분되는
규칙으로 전진부에 N개의 명제를 가지고 후진부에 단일 명제를 갖는다.
/* 규칙에 대한 주석(comment)을 위한 부분 */ }
```

그림 5. 규칙 베이스의 표현 양식

Fig. 5. Format of rule base.

그림 5의 표현 양식에서 {}은 규칙과 규칙을 구분해주며 -->은 전진부와 후진부를 구분해 주는 if절에서의 then의 역할을 한다. 전진부와 후진부에서의 명제는 'Is variable value'와 같이 표현된다.

(2) 객체 베이스

고장 진단에 필요한 변수, 즉 규칙의 전진부와 후진부의 명제들에서 이용되어지는 변수, 공정 데이터의 I/O address, 그리고 어떤 변수가 추론의 목표(goal)인지를 고장 진단 시스템에 알려주는 기능을 한다. 객체 베이스의 표현 양식은 그림 6과 같다.

그림 6의 표현 양식에서 공정 데이터를 나타내는 변수는 I/O address를 갖지만 공정 데이터가 아니면서

```
{ Objectname : objectname
Attributes : ( attributename1 : I/O address (any other numeric value) )
( attributename2 : I/O address (any other numeric value) )
.....
( attributenameN : I/O address (any other numeric value) )
Description : 변수 N개, 즉 objectname.attributename1,....., objectname.
attributenameN의 이용을 가진 변수가 정의됨. }
```

그림 6. 객체 베이스의 표현 양식

Fig. 6. Format of object base.

고장 진단에 필요한 변수(다른 규칙에 의해 추론가능한 중간 변수)는 퍼지화 과정을 거치지 않으므로 다른 수치 값을 넣어주면 된다. 그리고 고장 진단의 최종 목표(goal)가 되는 변수가 주어져야 하는데 목표가 되는 변수에 대해서는 I/O address대신 999를 주면 된다. 그럼으로써 고장 진단 시스템에게 고장 진단을 위한 추론의 최종 목표를 알려 준다. 규칙 참조에 의해서 어떠한 규칙의 후진부에서도 이용되지 않았으면 I/O 변수, 그렇지 못하면 중간 변수로 생각할 수 있다.

(3) 퍼지 베이스

퍼지 베이스는 객체 베이스에서 정의된 변수가 규칙 베이스에서 가질 수 있는 퍼지 용어를 정의하고, 공정 데이터의 퍼지화를 위해서 퍼지화와 관련된 정보를 고장 진단 시스템에 주기 위함이다. 입력 변수의 전체 집합을 이산화하는 것이 계산 효율뿐만 아니라 퍼지 전문가 시스템 개발 측면에서 장점이 있기 때문에 본 논문에서 구성한 퍼지 전문가 시스템에서도 입출력 변수를 나타내는 퍼지 집합이 이산적인 집합이 되게 퍼지 베이스를 구성한다. 그리고 퍼지 집합을 정의할 때 이용할 수 있는 점들의 수를 고정하면 퍼지화를 할 때 불필요한 작업을 필요로 하므로 퍼지 용어를 정의할 때 변수들에 따라서 전체 집합을 나타내는 데 이용되는 점들의 수에 있어서 융통성을 가지는 구조를 가지고 있다. 퍼지 베이스의 표현 양식을 설명하기 위해서 example.processvalue이라는 이름을 가지는 변수가 단위로는 [unit]를 가지고, 전체 집합의 범위로 [num1 num2]을 가지며, 표 1과 같은 이산화된 퍼지 집합을 갖는다고 하자.

표 1. 퍼지 베이스의 예

Table 1. Example of fuzzy base.

x = example.processvalue [unit]

	영역(range)	fuzzyvalue1	fuzzyvalue2	fuzzyvalueN
1	$x > dnum(N-1)$	r1cn	r2cn	rNcn
2	$dnum(N-2) < x \leq dnum(N-1)$	r1c(n-1)	r2c(n-1)	rNc(n-1)
.....
n-1	$dnum1 < x \leq dnum2$	r1c2	r2c2	rNc2
n	$x \leq dnum1$	r1c1	r2c1	rNc1

표 1과 같이 example.processvalue라는 공정 데이터타를 가리키는 변수가 이산화된 퍼지 집합을 가질 때 퍼지 베이스의 표현 양식은 그림 7과 같다.

```

1 variablename : example.processvalue /* 변수 이름 */
  universe of discourse : num1 num2 /* 베이스 변수의 전체집합의 상한과 하한 */
  unit : unit /* 단위 */
  number of value : N /* 변수가 가질 수 있는 기본 퍼지 용어의 갯수 */
  number of discretization : n /* 이산화 준위(quantization level)의 갯수 */
  number of modifier : m /* 정성자의 갯수 */
  modifier : hedge /* 정성자 */
  fuzzyvalue1 : r1c1 r1c2 r1c3 ..... r1cn
  fuzzyvalue2 : r2c1 r2c2 r2c3 ..... r2cn
  .....
  fuzzyvalueN : rNc1 rNc2 rNc3 ..... rNcn
  discretization : dnum1 dnum2 dnum3 ..... dnum(N-1)
  description : This is the example of fuzzy base.
    
```

그림 7. 퍼지 베이스의 표현 양식
Fig. 7. Format of fuzzy base.

규칙에서 정성자가 이용되지 않는다면 그림 7의 표현 양식에서 number of modifier, modifier부분들은 생략될 수 있다. 그리고 퍼지 용어 fuzzyvaluek (k=1,...,N)는 전체 집합을 이산화해서 이산화 준위의 갯수의 점들로 소속도를 순서적으로 나열함으로써 표현되어진다. discretization부분은 입출력 변수의 전체집합을 이산화 시키고 이용되는 구간을 나눌 때 사용되는 숫자들을 차례대로 열거 하는데, 공정 데이터를 주어진 I/O address로부터 읽어들이어서 퍼지화 하는 데 꼭 필요한 중요한 부분이다. 만약 공정 데이터가 아니고 추론에 의해 값을 얻을 수 있는 변수를 정의할 때 생략할 수 있는데, 그 경우에는 전체 집합을 이산화 준위의 갯수의 등간격으로 나누고 그 각각에 대한 소속도를 순서적으로 갖는 것으로 해석된다.

3) 지식 베이스 처리 모듈

지식 베이스 처리 모듈은 사용자 상호 교류 기능을 가지는 모듈로서, 사용자가 정의한 지식 베이스를 고장 진단 시스템의 나머지 부분에서 이용 가능하도록 변환해주는 기능을 수행한다. 퍼지화를 해야할 공정 데이터, I/O address, 그리고 그 외에 퍼지화에 필요한 정보를 넘겨주며, 그외의 규칙베이스와 객체 베이스에서 정의된 지식을 지식 베이스 관리 모듈에 넘겨 준다.

4) 지식 베이스 관리 모듈

지식 베이스 관리 모듈은 지식 베이스 처리 모듈로부터 지식 베이스의 지식을 받아들여 관리하며, 공정 데이터의 퍼지화된 값을 퍼지화 부분으로부터 받아들여 저장 관리한다. 추론 엔진부에서 고장 진단 관련 추론을 행할 때 규칙, 사실(공정 데이터의 퍼지화된 값), 그리고 기타의 추론에 필요한 정보를 주고, 추론 엔진에서 추론된 중간 결과를 받아 들이면서 추론 엔진과 지식을 상호 교류한다.

5) 추론 엔진

추론 엔진은 지식 베이스에서 주어진 고장 진단 관련 규칙과 입력으로 받아 들인 공정 데이터를 이용하여 고장 진단 정보를 추론해 내는 역할을 하는 부분으로 지식 베이스와 더불어 퍼지 전문가 시스템에서 가장 중요한 부분 중의 하나이다. 여기서는 본 논문의 추론 엔진에서 이용되는 추론에 관련된 사항들에 대해서 차례로 살펴 보도록 하겠다.

(1) 퍼지 추론

퍼지 추론은 알고 있는 인과 관계로부터 새로운 사실을 유도하는 것으로 일반적인 퍼지 추론은 다음과 같이 주어진다.

규칙 : IF x is A THEN y is B

사실 : x is A₁

결론 : y is B₁, where B₁ = A₁ ∘ R(A, B)

x, y는 각각 언어 변수이고, A, A₁은 전체 집합 U에서, B, B₁은 전체 집합 V에서 정의된 언어 값을 나타내는 퍼지 집합이라고 하면, 결론 B₁은 규칙의 전건부와 후건부의 퍼지 집합 A, B로부터 퍼지 관계 R(A, B)를 형성한 후, 입력으로 주어진 퍼지 집합 A₁을 또하나의 관계로 보아 이들 두개의 관계를 합성하여 추론된다. 퍼지 추론에서 추론에 중요한 요소는 퍼지 관계와 합성이므로 적당한 퍼지 관계와 합성 연산을 선택하는 게 중요하다. 퍼지 관계는 퍼지 함의(implication) 함수에 의해서 나타내어지는데 퍼지 함수를 정의하는 많은 방법들이 소개되어 있다.^[11] 인간의 직관에 근거한 판단 기준(criterion)에 따라 퍼지 추론 방법을 비교한 결과가 제시되어 있는데^[12], 본 논문에서는 그 비교결과 적당한 추론 방법으로 제시되어진 추론 방법중의 하나인 퍼지 관계 R_g를 선택하였고 합성 방법으로는 가장 널리 이용되어지는 max-min 합성 연산을 이용하였다. 퍼지 관계 R_g는 식(1)과 같이 정의된다.^[12]

$$R_g = \int_{U \times V} [\mu_A(u) \rightarrow_g \mu_B(v)] / (u, v) \quad (1)$$

$$\text{where } \mu_A(u) \rightarrow_g \mu_B(v) = \begin{cases} 1 & \mu_A(u) \leq \mu_B(v) \\ \mu_B(v) & \mu_A(u) > \mu_B(v) \end{cases}$$

max-min 합성 연산은 식(2)와 같이 행해진다.

$$B_1 = \int_V \vee_{u \in U} [\mu_A(u) \wedge \mu_R(u, v)] / v \quad (2)$$

(2) 추론 메카니즘

앞에서 언급한 퍼지 추론은 전건부에 단일 명제를 갖는 규칙만 다루었는데, 대부분의 규칙들의 전건부에는 두 개 이상의 명제가 복합적으로 구성되어 있다.

따라서 여기서는 전진부에 다중 명제를 가지는 규칙들이 주어졌을 때의 추론 메카니즘에 대해서 살펴 보기로 하겠다. 전진부에 다중 명제를 가지는 규칙은 크게 다음의 두 가지 패턴이 확장된 형태를 가진다.

패턴 1) IF x is A AND y is B THEN z is C.

패턴 2) IF x is A OR y is B THEN z is C.

먼저 패턴 1을 고려해서 다음과 같이 규칙과 사실이 각각의 확실도(certainty factor)를 가지고 다음과 같이 주어졌다고 하자.

규칙 : IF x is A AND y is B THEN z is C. (CF_R)

사실 : x is A_1 (CF_1), y is B_1 (CF_2)

결론 : z is C_1 . (CF_C)

결론을 C_1 이라고 하면, 퍼지 관계 R_R 를 이용하므로 [13]에 의해 식(3), 식(4)로 구할 수 있다.

$$C_1 = [A_1 \circ R(A, C)] \cup [B_1 \circ R(B, C)] \quad (3)$$

$$CF_C = \min(CF_1, CF_2) * CF_R \quad (4)$$

패턴 2)의 경우를 고려하면 패턴 1)과 유사하게 다음과 같이 구할 수 있다.

규칙 : IF x is A OR y is B THEN z is C. (CF_R)

사실 : x is A_1 (CF_1), y is B_1 (CF_2)

결론 : z is C_1 . (CF_C) where

$$C_1 = [A_1 \circ R(A, C)] \cap [B_1 \circ R(B, C)] \quad (5)$$

$$CF_C = \max(CF_1, CF_2) * CF_R \quad (6)$$

전진부에 3개 이상의 다중 명제를 갖는 규칙에 대해서는 위의 두 가지 패턴을 반복 적용함으로써 추론을 행할 수 있다.

(3) 증후 결합 (evidence combination)

증후 결합은 둘 이상의 규칙이 후진부에 같은 언어 변수를 가지고 하나의 추론 결과를 유도하기 위해 이용될 때 각각의 규칙에 의한 추론 결과를 결합하여 보다 타당한 추론 결과를 얻기 위하여 필요하다. 예를 들어 다음과 같이 규칙과 사실이 주어졌다고 하자.

규칙 1: IF x is A_1 THEN z is C_1 . (CF_1)

규칙 2: IF x is A_2 THEN z is C_2 . (CF_2)

사실 : x is A_3 . (CF_3)

결론 : z is C_3 . (CF_C)

결론 C_3 를 구하기 위해서 먼저 규칙 1과 규칙 2로부터의 추론 결과를 퍼지 관계 R_R 와 합성 연산 max(sup)-min을 취해서 각각 구한다. 그리고 나서 규칙 1과 규칙 2로부터 나온 추론 결과를 'min' 연산

자를 이용하여 결합함으로써 식(7), 식(8)과 같이 결론 C_3 를 구할 수 있다.^[14]

$$C_3 = [A_3 \circ R(A, C_1)] \cap [A_3 \circ R(A_2, C_2)] \quad (7)$$

$$CF_C = CF_3 * CF_1 + CF_3 * CF_2 - CF_3 * CF_1 * CF_3 * CF_2 \quad (8)$$

전진부의 언어 변수가 다른 전체 집합에서 정의되었다 하더라도 각각 추론한 후 결합 연산자로 min을 취함으로써 결론을 유도할 수 있다. 그리고 세 개 이상의 규칙이 같은 언어 변수를 후진부에 두어 추론을 유도할 경우 위의 과정을 반복함으로써 추론을 유도할 수 있다.

(4) 추론 단계(reasoning chaining)

퍼지 전문가 시스템에서는 한 규칙의 추론 결과가 다른 규칙의 전진부의 입력으로 인가되는 경우가 많으므로 그에 상응하는 추론 트리를 형성해서 추론을 행하는 것이 필요하다. 본 논문에서 구성한 퍼지 전문가 시스템에서는 추론을 행하는데 있어서 목표(goal)로 주어진 언어 변수를 추론 트리의 최상단에 위치 시키고 규칙 참조에 의해 역방향 체인(backward chaining)으로 트리를 형성한 후 추론 트리를 따라 전방향 추론(forward reasoning)을 행함으로써 목표로 주어진 언어 변수에 대한 새로운 사실을 추론할 수 있게 된다.

6) 언어 근사

언어 근사 부분은 사용자와의 상호 교류 기능을 담당하는 부분으로 고장 진단 퍼지 전문가 시스템에서 추론한 퍼지 집합의 벡터 형태로 되어 있는 고장 진단 정보를 사용자가 이해할 수 있게 변환해주는 역할을 한다. 여기서는 언어 근사를 위해서 추론된 퍼지 집합과 미리 정의 되어 있는 퍼지 용어와의 Hamming distance를 구해 가장 짧은 거리를 갖는 퍼지 용어를 선택하는 기본적인 방법을 이용한다. n개의 점으로 표현되어지는 전체 집합 U에서 정의되는 두 퍼지 집합 A, B의 Hamming distance d(A,B)는 식(9)와 같이 구할 수 있다.

$$d(A, B) = \sum_{i=1}^n \sum_{u_i \in U} |\mu_A(u_i) - \mu_B(u_i)| \quad (9)$$

그리고 전체 집합 U 구간에서 일정한 값을 갖는 다음과 같은 퍼지 집합에 대해서는 unknown으로 언어 근사를 취한다.

$$\sum_{i=1}^n \alpha / x_i =$$

7) 추론 알고리즘

앞에서 언급되어진 퍼지 전문가 시스템을 구성하는 각 부분을 이용하여 고장 진단에 관련된 정보를 추론

하는 알고리즘을 나타내면 그림 8와 같다.

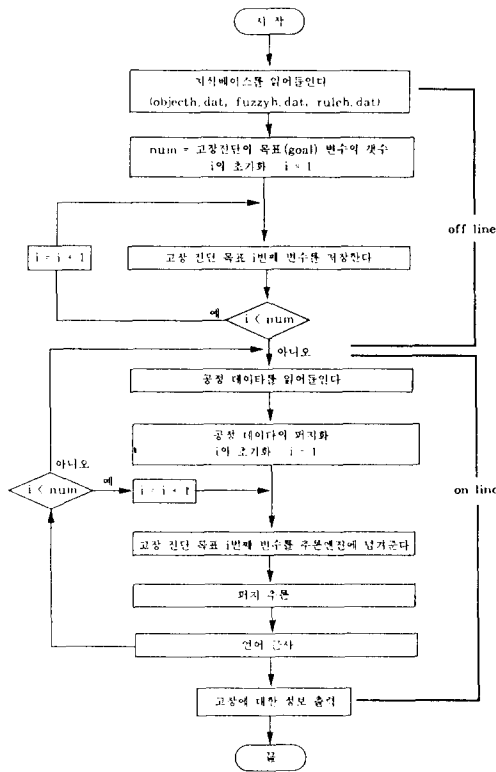


그림 8. 고장 진단 추론 알고리즘
Fig. 8. Fault diagnosis inference algorithm.

IV. 지식 베이스 구축 및 실험

앞 장에서 구성한 고장 진단 퍼지 전문가 시스템의 검증을 위해서 본 장에서는 지식 베이스를 구축하고 구축된 지식 베이스를 토대로 실험을 해 보고자 한다. 구성된 고장 진단 퍼지 전문가 시스템의 효율성을 적절히 보이기 위해서 2장에서 설명한 서울화력 4호기 발전소 보일러 시스템 모델을 이용하여 실험을 하였다.

1. 지식베이스 구축

본 절에서 구축한 지식 베이스는 드럼형 보일러 시스템을 가지고 있는 서울화력 발전소와 보령화력 발전소를 방문하여 발전부의 운전원과 제어부의 제어원을 통한 설문조사와 인터뷰, 자료[5][7][15][16], 그리고 시뮬레이터를 근거로 지식 베이스를 구축하였다. 본 논문의 연구 범위는 드럼 수위 루프의 상태를

판별해 주고, 급수량 감지기 고장, 급수 제어 밸브 고장, 그리고 water wall 튜브 파열을 감지해 주는 고장 진단 시스템의 구축이다. 따라서 드럼 수위의 상태를 판별해 주기 위한 지식 베이스, 급수량 감지기 고장 감지를 위한 지식 베이스, 급수 제어 밸브 고장 감지를 위한 지식 베이스, 그리고 water wall 튜브 파열 감지를 위한 지식 베이스를 구축 한다.

드럼 수위의 상태 판별을 위한 지식 베이스의 구축은 드럼 수위의 값과 드럼 수위의 변화량에 의해서 행해질 수 있다. 드럼 수위 루프는 보일러 시스템의 가장 중요한 서브 시스템의 하나로 운전반에 드럼 수위 상태에 대한 경보 장치를 가지고 있다. 운전반의 기록 차트(recording chart)에 전달되는 드럼 수위치는 드럼 좌우 양단에 있는 감지기에 의해 입력된 후 드럼 압력에 의해 보상된 값에 의해 결정된다. 정상 운전 중에 드럼의 중앙 이하 부분에는 물이 차 있고, 상부에는 증기가 차 있으나 만일 수위가 너무 높으면 carry over현상이 발생하며 반대로 너무 낮으면 드럼 하부의 과열 및 튜브의 손상을 초래하여 큰 사고를 유발하게 되므로 드럼 수위는 항상 정상으로 유지해야 한다.

드럼 수위 상태의 이상을 알려 주는 경보 장치는 드럼 수위가 유지되어야 하는 설정치인 경보 상한 설정치(high alarm setting value)와 경보 하한 설정치(low alarm setting value)를 가지고 있어서 드럼 수위가 설정한 경보 상한 설정치보다 높게 유지되거나 설정한 경보 하한 설정치 보다 낮게 유지되면 운전반의 판별에 의한 경보등을 통해서 드럼 수위 상태의 이상을 알려 준다. 드럼 수위의 상태는 '정상이다(normal)', '위험하다(alert)', '아주 위험하다(worst)' 라는 용어들로 표현되며 드럼 수위의 상태의 판별을 위해서 "state.drumlevel"이라는 변수를 정의했다. 그리고 드럼 수위의 상태 판별에 이용되어지는 공정 데이터인 드럼 수위와 드럼 수위의 변화량을 나타내는 변수로 각각 "drum. level", "change.drumlevel" 이라고 정의하고서 다음과 같은 객체 베이스를 구축했다.

```

} Objectname : state
  Attributes : ( drumlevel ; 999 )
  Description : state.drumlevel이라는 목표 (goal) 변수 정의 {
} Objectname : change
  Attributes : ( drumlevel ; 37 )
  Description : change.drumlevel 이라는 입력변지로 37을 가진 공정 데이터의 변화량을 가리키는 변수 정의 {
    
```



```
{ Objectname : drum
Attributes : ( level ; 37 )
Description : drum.level이라는 입력변지로 37
을 갖는 변수 정의 }
```

드럼 수위에 대한 퍼지 베이스를 구축하기 위해서 드럼 수위의 지시치가 0인치 근처이면 '중간이다 (middle)'라고 표현하였고, 경보 상한 설정치 보다 낮으면서 그 근처이면 '약간 높다(high)'라고 표현하였다. 경보 하한 설정치 보다 높으면서 그 근처이면 '약간 낮다(low)'라고 표현하였고, 경보 하한 설정치 보다 낮으면 '낮다(lower)'라고 표현하였다. 경보 상한 설정치 보다 높으면 '높다(higher)'라고 표현하였고, 정지 상한 설정치에 가까우면 '아주 높다 (highest)'라고 표현하였으며, 정지 하한 설정치에 가까우면 '아주 낮다(lowest)'라고 표현하였다. 서울화력 발전소 4호기 보일러 시스템의 드럼 수위의 경보 상한 설정치는 4인치이고, 경보 하한 설정치는 -4인치이다. 드럼 수위 상태의 이상에 대한 판단은 운전원에 따라 다르다. 여기서는 드럼 수위 지시치가 2인치보다 높거나 -2인치보다 낮으면 위험하다고 판단하고 수면 지시계의 상한치와 하한치인 8인치와 -9인치를 드럼 수위 지시치가 벗어 나면 아주 위험하다고 판단한다는 서울화력에서의 인터뷰 내용을 토대로 드럼 수위에 대해 이산화통한 퍼지화는 표 2와 같다.

표 2. 드럼 수위의 퍼지화

Table 2. Fuzzification of drum level.

dl = 드럼 수위 (inch)

	영역(range)	highest	higher	high	middle	low	lower	lowest
1	dl > 8	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	6 < dl <= 8	0.5	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	4 < dl <= 6	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	2 < dl <= 4	0.0	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
5	1 < dl <= 2	0.0	0.0	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0
6	-1 < dl <= 1	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0
7	-2 < dl <= -1	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.0	0.0
8	-4 < dl <= -2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.5	0.0
9	-6 < dl <= -4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
10	-9 < dl <= -6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.5
11	dl <= -9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0

표 2에 나타나는 이산화에 근거한 드럼 수위에 대한 퍼지 베이스는 다음과 같다.

```
{ variablename : drum.level
universe of discourse : -15 15
unit : inch
number of value : 7
number of discretization : 11
number of modifier : 1
```

```
modifier : not
highest : .0 .0 .0 .0 .0 .0 .0 .0 .5 1.0
higher : .0 .0 .0 .0 .0 .0 .0 .5 1.0 1.0 .0
high : .0 .0 .0 .0 .0 .0 1.0 .5 .0 .0 .0
middle : .0 .0 .0 .0 .5 1.0 .5 .0 .0 .0 .0
low : .0 .0 .0 .5 1.0 .0 .0 .0 .0 .0 .0
lower : .0 1.0 1.0 .5 .0 .0 .0 .0 .0 .0 .0
lowest : 1.0 .5 .0 .0 .0 .0 .0 .0 .0 .0 .0
discretization : -9 -6 -4 -2 -1 1 2 4 6 8
description : 드럼 수위의 퍼지 베이스 }
```

드럼 수위의 퍼지 베이스를 정의한 대로 드럼 수위의 변화량과 드럼 수위의 상태에 대한 퍼지 베이스를 구축한 다음 앞에서 정의된 객체베이스와 드럼 수위, 드럼 수위의 변화량, 드럼 수위의 상태에 대한 퍼지 베이스를 이용하여 구축한 드럼 수위의 상태에 관한 규칙 베이스는 다음과 같다.

```
{ Rulename : 1
( Is drum.level higher OR Is drum.level lowe )
->
( Is state.drumlevel alert )
Certainty : 1.0
Description : 드럼 수위가 높거나 낮으면 드럼 수위의 상태는 위험하다.
IF drum.level is higher OR drum.level is lower,
THEN state.drumlevel is alert. }
```

표 3. 드럼 수위의 상태 판별을 위한 규칙베이스
Table 3. Rule base for checking state of drum level.

Rulename	전건부	후건부
2	Is drum.level highest OR Is drum.level lowest	Is state.drumlevel worst
3	(Is drum.level high OR Is drum.level low) AND Is change.drumlevel zero	Is state.drumlevel normal
4	Is drum.level middle AND Is drum.level high	Is state.drumlevel normal
5	(Is change.drumlevel positive OR Is change.drumlevel positiveabrupt) AND Is drum.level low	Is state.drumlevel alert
6	(Is change.drumlevel negative OR Is change.drumlevel negativeabrupt)	Is state.drumlevel alert

또한 급수량 감지기 고장 감지를 위한 지식 베이스, 급수 제어 밸브 고장 감지를 위한 지식 베이스, 그리고 water wall 튜브 파열 감지를 위한 지식 베이스를 구축해서 총 14개의 객체를 갖는 객체 베이스와 그 객체에 대한 퍼지 용어를 정의한 퍼지 베이스, 그리고 53개의 규칙에 총 176개의 전건부 명제를 갖

는 규칙 베이스를 구축했다. 지면 관계상 객체 베이스만 나타내면 표 4와 같다.

표 4. 객체 베이스
Table 4. Object base.

Objectname	Attributes	I/O Address	Description
state	drumlevel	999	목표변수
flowtrend	3element	99	중간변수
	fw&level	99	중간변수
fault	fwsensor	999	목표변수
	fwvalve	999	목표변수
waterwall	tuberrupture	999	목표변수
change	drumlevel	37	입력변수
	fw	39	입력변수
	mainsteamflow	19	입력변수
	fwcontrolout	13	입력변수
drum	level	37	입력변수
demand	power	1	입력변수
flow	fw	39	입력변수
controlout	fwvalve	13	출력변수

이렇게 구축된 지식 베이스는 지식 베이스의 표현 양식대로 그림 9에 나와 있는 X-window환경하에서 motif를 이용해서 구축된 사용자 인터페이스를 이용해서 각 지식베이스를 데이터 화일의 형태로 구축하면 지식 베이스가 구축된다.

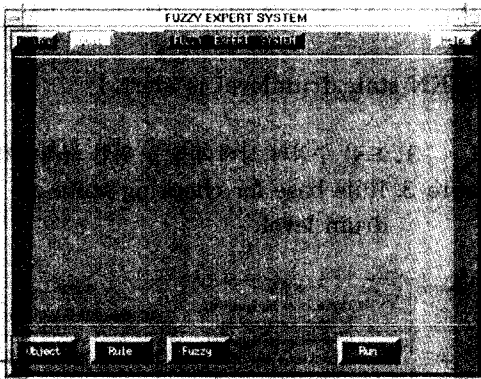


그림 9. 사용자 인터페이스
Fig. 9. User interface.

2. 실험 환경

사용된 실험 환경은 퍼지 전문가 시스템의 기능을 담당하는 호스트 컴퓨터로서 SUN 워크스테이션을 이용하였고, 공정 제어를 위해 핵심이 되는 모듈로는 모듈 자체에 네트워크를 위한 이더넷(ethernet)포트를 내장하고 있으며 MC68030을 탑재한 CPU30을 사용하였다. 공정 제어기로는 PID제어기가 이용된다. 그리고 서울 화력 4호기 발전소 보일러 시스템을 디지털로 구현한

시뮬레이터로서도 CPU30이 이용된다. CPU30은 VME BUS에 인터페이스 되어서 전체적으로 SUN 시스템이 네트워크를 통해 정보를 주고 받게 된다. 또 실시간 운영체제인 VxWorks 관련 화일은 LAN(Local Area Network)을 통해 가져다가 RAM에 올려놓고 프로세서 모듈에서 실시간 목적을 위해 이용한다. 실험 시스템 구성도는 그림 10과 같다.

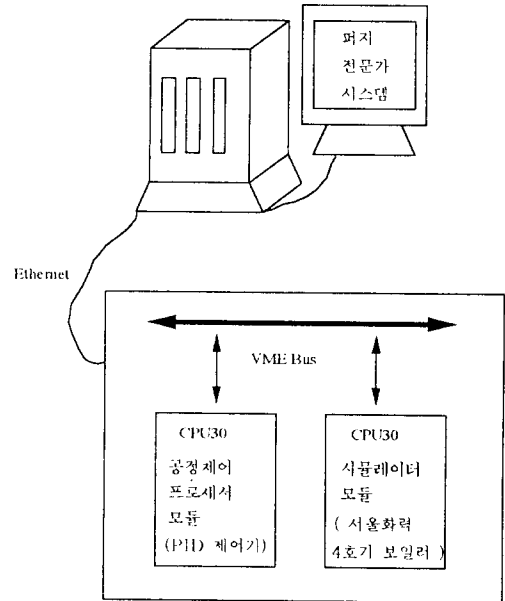


그림 10. 실험 시스템 구성도
Fig. 10. Configuration of experiment system.

3. 고장 진단 실험

급수량 감지기 고장, 급수 제어 밸브 고장, water wall 튜브 파열을 모사하면서 각 부위의 고장 여부를 감지하고 드림 수위의 상태를 판별하고자 한다. 제어 모듈에서의 샘플링 시간은 0.25[초]로 하였고 퍼지 전문가 시스템에서의 샘플링 시간은 2[초]로 하였다. 그리고 공정 데이터에 대한 단위는 공정 데이터가 가질 수 있는 상한치를 100[%]로, 하한치를 0[%]로 환산한 [%]단위를 이용하였다. 참고로 드림 수위 루프와 관련된 공정 변수의 목록과 그 약어, 변수 범위(range)와 단위 그리고 50[%], 75[%], 100[%] 보일러 출력에서의 정상상태 값은 표 5와 같다.

표 5에 나온 공정 변수의 범위의 상한치를 100[%]로 변환하고, 하한치를 0[%]로 변환한 [%]단위를 앞으로 나올 그림에서 이용하고자 한다. 그리고 급수 제어 밸브의 개도(BFP)의 단위도 100[%]는 밸브가 완전히 열릴 때를 의미하며, 0[%]는 완전히 닫혔을

때를 의미한다. 앞으로 고장에 관련된 진단 결과(급수량 감지기 고장 여부, 급수 제어 밸브 고장 여부, water wall 튜브 파열 여부)를 나타낼 때는 정상이면 80을 출력하고, 고장이면 20을 출력하며, unknown이면 60을 출력하도록 하겠다. 드럼 수위의 상태에 대한 진단 결과를 나타낼 때는 정상이면 80을 출력하고, 위험하면 40을 출력하며, 아주 위험하면 20을 그리고 unknown이면 60을 출력하도록 하겠다. 고장 진단은 보일러 시스템이 정상 상태에 도달했다고 볼 수 있는 1200[초]부터 행하였고 그 전의 진단 결과는 정상이라고 본다.

표 5. 공정 변수의 목록
Table 5. List of process value.

공정 변수	약어	범위	단위	정상 상태 값		
				출력(%)	50	75
Power	PW	(0-137.5)	MW	68.5	103.0	137.5
Feedwater flow	F_{FW}	(0-500.0)	Ton/Hr	200	300	400
Main Steam Flow	F_{MS}	(0-500.0)	Ton/Hr	200	320	440
Drum Level	L	(-15-15)	Inch	0.0	0.0	0.0

1) 급수량 감지기 고장 모사와 진단 실험

급수량 감지기 고장의 경우로서 출력 90[%]에서의 정상 운전 중에 2000[초]부터 급수량 감지기가 실제 급수량보다 점점 적게 읽어들이어 2500[초]이후로는 실제 급수량 보다 150[ton/hr (30[%])]만큼 적게 읽어들이는 경우를 고려해 보았다. 고장 모사시의 데이터의 흐름과 고장 진단 결과는 그림 11과 같다. 마찬가지로 드럼 수위가 일시적인 현상을 거쳐 정상으로 복귀하고 진단 결과가 급수량 감지기가 고장이라는 걸 보여주고 있다.

- (a) 급수 제어 밸브 개도(제어 출력)와 밸브 고장 진단 결과
 - (b) 급수량과 급수량 감지기 고장 진단 결과
 - (c) 급수량과 water wall 튜브 파열 진단 결과
 - (d) 드럼 수위와 water wall 튜브 파열 진단 결과
 - (e) 드럼 수위와 드럼 수위의 상태 진단 결과
- 공정 데이터 (————) 고장 진단 결과 (- - - -)

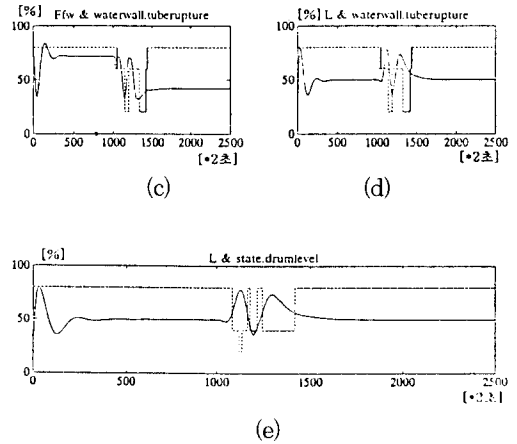
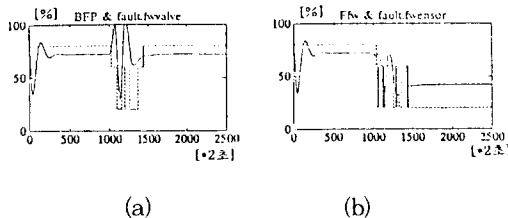


그림 11. 급수량 감지기의 고장 모사시의 데이터의 흐름과 고장 진단 결과

Fig. 11. Process data flow and fault diagnosis result in feedwater flow sensor fault case.

2) 급수 제어 밸브 고장 모사와 진단 실험

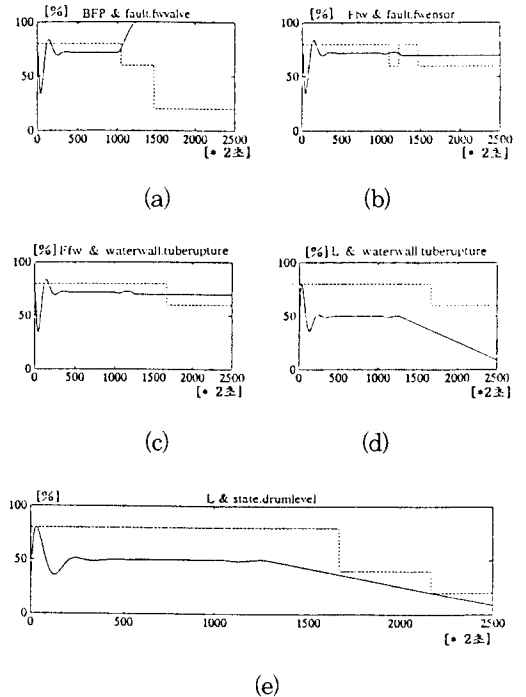


그림 12. 급수 제어 밸브 고장 모사시의 데이터의 흐름과 고장 진단 결과

Fig. 12. Process data flow and fault diagnosis result in feedwater flow control valve fault case.

급수 제어 밸브 고장의 경우로서 보일러 출력 90 [%]에서의 정상 운전 중에 2000[초]부터 두 개의 급수 제어 밸브 중 급수 제어 밸브 하나가 점점 닫혀 2500[초]이후로는 밸브 하나의 개도가 제어 출력에 관계없이 40[%]에서 고정이 되는 경우를 고려해 보았다. 고장 모사시의 데이터의 흐름과 고장 진단 결과가 그림 12에 나타나 있다. 급수 제어 밸브 하나의 고장을 다른 쪽에서 보충해주지 못하므로 드럼 수위의 제어가 정상으로 유지되지 못함을 볼 수 있고, 고장 진단 결과는 급수 제어 밸브가 고장이라는 걸 보여 준다.

(a) 급수 제어 밸브 개도(제어 출력)와 밸브 고장 진단 결과

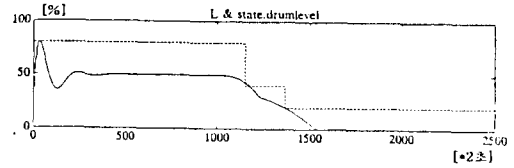
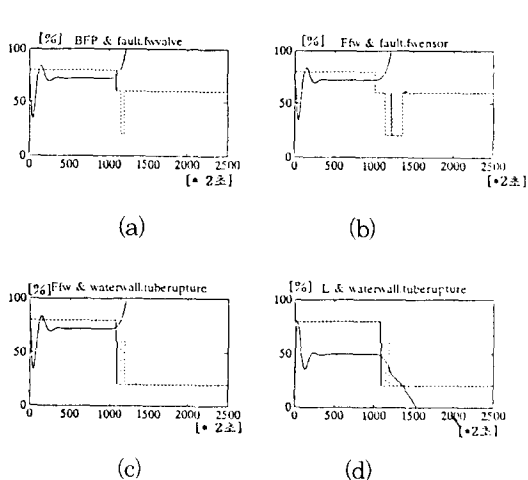
- (b) 급수량과 급수량 감지기 고장 진단 결과
- (c) 급수량과 water wall 튜브 파열 진단 결과
- (d) 드럼 수위와 water wall 튜브 파열 진단 결과
- (e) 드럼 수위와 드럼 수위의 상태 진단 결과

공정 데이터 (————) 고장 진단 결과 (- - - -)

3) Water wall 튜브 파열 모사와 진단 실험
Water wall 튜브가 파열되는 경우로서 보일러 출력 90[%]에서의 정상 운전 중에 2000[초]에서 water wall 튜브가 파열되는 경우를 고려해 보겠다. 고장 모사시의 데이터의 흐름과 고장 진단 결과가 그림 13에 나타나 있다. 고장 진단 결과가 water wall 튜브가 파열이라는 걸 보여 주고 있다.

(a) 급수 제어 밸브 개도(제어 출력)와 밸브 고장 진단 결과

- (b) 급수량과 급수량 감지기 고장 진단 결과
- (c) 급수량과 water wall 튜브 파열 진단 결과
- (d) 드럼 수위와 water wall 튜브 파열 진단 결과
- (e) 드럼 수위와 드럼 수위의 상태 진단 결과



(e)

그림 13. water wall 튜브 파열 모사시의 데이터의 흐름과 고장 진단 결과

Fig 13. Process data flow and fault diagnosis result in water wall tube rupture case.

4. 모의 실험 결과 검토

앞 절에서 행한 고장 진단 모의 실험에 대한 결과를 요약하면 표 6과 같다.

표 6. 고장 진단 실험 결과

Table 6. Result of fault diagnosis experiment.

급수량 감지기 고장	드럼 수위 상태	급수량 감지기 고장	급수 제어 밸브 고장	waterwall tube 파열
일시적-> 정상	일시적-> 정상	일시적-> 정상	일시적-> 정상	일시적-> 정상
급수 제어 밸브 고장	위험-> 아주 위험	unknown	unknown-> 고장	unknown
waterwall tube 파열	위험-> 아주 위험	일시적-> unknown	일시적-> unknown	파열

표 6을 살펴 보면 본 논문에서 구성한 고장 진단 퍼지 전문가 시스템은 각 고장의 경우에 대해서 합당한(reasonable) 고장 진단을 함을 볼 수 있다.

V. 결론 및 추후과제

본 논문에서는 화력 발전소 드럼형 보일러 고장 진단을 위한 전문가 시스템을 퍼지 집합과 퍼지 논리를 이용하여 구성하였다. 구성된 퍼지 전문가 시스템은 공정 데이터를 입력으로 받아 들여서 지식 베이스에 근거한 퍼지화를 행하는 기능을 가지고 있고, 퍼지 집합을 정의하는데 이용되는 점들의 수에 있어서 융통성(flexibility)을 가지고 있으며, 지식 베이스의 첨삭이 용이한 특징을 가지고 있다. 그리고 드럼 수위 루프를 중심으로 지식 베이스를 구축하고 서울화력 4호기 발전소 보일러 시스템을 모사한 시뮬레이터를 이용하여 모의 고장 진단 실험을 함으로써 구성된 퍼지 전문가 시스템의 효용성을 보였다. 구체적으로 모의 실험에서의 고장 진단 시간을 Sun Sparc-2에서 조사해 보았는데 6개의 규칙에 총 14개의 명제를 가지는 지식 베이스를 가지고 추론했을 때 걸리는 시

간은 0.254[초]였고 53개의 규칙에 총 176개의 명제를 가지는 지식 베이스를 가지고 추론했을 때 걸리는 시간은 1.844[초]였다. 구성한 퍼지 전문가 시스템은 제어 구조를 잘 모르는 운전반의 운전원에게 감지거나 엑츄에이터의 고장시의 고장에 대한 정보를 줌으로써 운전 지원 시스템으로의 효과도 기대된다.

본 논문의 연구 결과를 바탕으로 추후에 더 연구되어야 할 과제를 살펴보면 첫째, 고장 진단에 필요한 규칙이 더 많아질 경우에 실시간 진단을 위한 연구가 요구된다. 둘째, 본 논문에서 구축한 지식 베이스에서의 규칙에 대한 확신도를 지식 습득상의 어려움으로 인해 모두 1로 주었는데, 지식 베이스에서의 확신도의 조정이 필요하다. 셋째, 고장 진단 결과에 대해 진단의 근거에 대한 설명 기능이 요구된다.

감사의 글

이 논문이 완성하기까지 많은 도움을 주신 한국과학기술원의 김병국 교수님, 박동조 교수님, 이재혁 박사님, 서창준 선배님에게 감사를 드립니다. 지식 베이스를 구축하는데 있어서 설문조사와 인터뷰에 응해주신 서울화력의 도구현과장님, 고을수씨, 김민식씨, 보령화력의 박승연과장님, 박형구 과장님, 이상운씨, 오금연씨를 비롯한 서울화력과 보령화력의 제어부와 발전부에 근무하시는 관계자 여러분, 그리고 조언을 해주신 한전 기술 연구원의 김은기 부장님께 감사를 드립니다.

參考文獻

- [1] "발전소 제어 시스템용 고급 제어 알고리즘 및 고장 진단 퍼지 전문가 시스템 개발", 중간 보고서, 한국전력공사, 1993.10
- [2] "분산 제어 시스템의 고장 대처 기능 및 제어 언어의 구현", 최종 보고서, 한전 기술 연구원, 1993.3
- [3] David W. Rolston, "Principles of Artificial Intelligence and Expert Systems Development", McGraw-Hill, 1988.
- [4] K.S. Leung and W. Lam, "Fuzzy Concepts in Expert Sysytems", IEEE computer, September, pp 43-56, 1988.

- [5] "서울 화력 4호기 운전 조작 설명서", 한국 전력 공사, 서울화력 발전소, 1983
- [6] Gunter Klefenz, "Automatic Control of Steam Power Plants", Hartmann & Braun AG., Minden, Bibliographisches Institut, Zurich, 1986.
- [7] 김 재선, "신호 흐름도 모델을 이용한 화력 발전소 드립형 보일러 시뮬레이터의 개발에 관한 연구", 한국 과학 기술원, 석사학위논문, 1990
- [8] 이 현숙, "확장된 모호 추론 방식을 이용한 전문가 시스템 개발 도구의 설계 및 구현", 포항 공과대학 석사학위논문, 1991
- [9] 이 건명, "퍼지 전문가 시스템 개발 도구의 설계 및 구현", 한국과학기술원, 석사학위논문, 1992
- [10] Danny Cheung, Y. Leung, and K. S.Leung, "Product Development of A Fuzzy Logic Expert System Shell", Proceedings of International Conference on Fuzzy Logic & Neural Networks, Iizuka, Japan, July 20-24, 1990, pp 853-856
- [11] C.C. Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller - Part II", IEEE Trans. on SMC, Vol 20, No 2, pp 419-435, 1990.
- [12] M. Mizumoto and Zimmermann, "Comparison of Fuzzy Reasoning Methods", Fuzzy sets and Systems, Vol 8, pp 253-283, 1982.
- [13] M. Mizumoto, "Fuzzy Controls Under Various Fuzzy Reasoning Methods", Information Science, Vol 45, pp 129-151, 1988.
- [14] I.B. Turksen and Y. Tian, "Combination of Rules or Their Consequences in Fuzzy Expert Systems", Fuzzy sets and Systems, Vol 58 pp 3-40, 1993
- [15] "화력 발전 고장 사례집", 한국전력공사, 삼천포연수원, 1987
- [16] "경보 해설서", 한국전력공사, 보령화력 발전소, 1991

著 者 紹 介



邊 昇 炫(準會員)

1970年 1月 21日生. 1992年 2月 연세대학교 공과대학 전기공학과 졸업(공학사). 1994年 2月 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사). 1994年 3月 ~ 현재 한전기술연구원의 연구원임, 현재 군 복무중. 주관심 분야는 인공지능, 디지털 제어 등임.



朴 世 華(正會員)

1965年 7月 23日生. 1988年 2月 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업(공학사). 1990年 2月 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사). 1990年 3月 ~ 현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사과정 재학중. 주관심 분야는 내고장성 및 신뢰성 제어시스템 설계 및 고장진단 등임.

卞 增 男(正會員) 第 27卷 第 1號 參照

현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 교수