

퍼지추론을 이용한 설비가동상태진단 모델 연구

정영득* · 박주식**

*전주공업대학 시스템 정보경영과 조교수
**(주)한스환경엔지니어링 부설연구소 책임연구원

Development of Equipment Operating Condition Diagnosis Model Using the Fuzzy Inference

*Young-Deuk Jeong · **Ju-Sik Park

*Dept. of Industrial and System Engineering, Jeonju Technical College
**Hans Environment Engineering Co. Ltd

In the study, Methods for operating measures in equipment security to find out dangerousness timely in the system and to need for the prevention and measures. The method for analyzing and reconstructing the causes of accident of equipment in site, and try to save the information of site in real-time and to analyze the state of equipment to look for the factors of accidents. By this analysis, one plan for efficiency of production, Equipment Fault Diagnosis Management and security is integrating and building module of using the Fuzzy Inference based on fuzzy theory.

The case study is applied to the industrial electric motors that are necessarily used to all manufacturing equipment. Using the sensor for temperature is attached to gain the site information in real time and to design the hardware module for signal processing. In software, realize the system supervising and automatically saving to management data base by the algorithm based in fuzzy theory from the existing manual input system

Keywords : Inference, Real-time information, Fuzzy control, Preventive maintenance, Resolution

1. 서 론

오늘날 산업설비들은 첨단산업시대로 접어들면서 소비자의 다양한 욕구형태와 산업의 발달로 기업간의 경쟁은 점점 더 치열해져서 품질관리, 생산성 향상 같은 경제적인 기업 운영에 깊은 관심을 갖게 되었다. 또한 단순 반복 작업의 회피와 기능을 겸비한 노동인력의 부족 등 기업의 내외적 환경의 변화에 따라 자동화 설비구축과 함께 복잡하고 다양화되어 가고 있는 추세이다[3][6].

그러나, 국내 중소기업들은 산업환경과 시대적 상황에 따라 생산성 향상을 위해 설비의 자동화 및 고급화 등을 꾸준히 추진하고 있는 가운데 설비관리기술은 답보된 수준에 머물고 있는 실정이다. 유지와 보수능력, 그리고 안전성확보 및 대책에 따라 <표 1>과 같이 많은 운영상의 문제점이 나타나고 있다[10].

이와 같은 문제점은 단순히 생산설비 자체의 문제뿐만 아니라 생산의 목표달성과 제조원가에 막대한 영향을 미치고 있다. 설비관리의 개념적인 변천보다 더욱 중요한 변화는 설비의 자동화에 따르는 관리기술대응으로 최근에는 생산현장의 모든 설비에 Hardware 또는 Software가 상호 유기적으로 하나의 System으로 운영되고 있다.

<표 1> 자동화 설비 운영상의 문제점

NO	원 인	분포
1	유지 및 보수의 어려움	52 %
2	담당자의 기술 부족 및 경험 부족	23 %
3	자동화 설비의 빈번한 고장	15 %
4	자동화 설비의 성능 불량	10 %

이러한 운전에 따라 생산설비에서 빈번한 가동정지 및 장기운전과 환경에 의한 환경적, 전기적, 기계적 스트레스를 받아 설비 노후화가 불규칙으로 진행되어 가동상태에 따라 전문적인 설비보전시스템의 필요성이 점차 증대되고 있다. 특히, 설비들은 가동중에 결함 문제점이 발생하기 때문에 정지중에 하는 정기점검으로는 정확한 설비상태를 알기에는 곤란하다. 또한 작업자, 관리자의 주관적인 해석에 따라 같은 상태를 두고 해석이 다르게 되어 혼란을 야기하기도 한다.

그래서 본 연구에서는 실시간으로 현장에 가동중인 설비상태를 모니터링을 하면서 작업자의 주관적인 해석에 따라 서로 다른 결론을 내리는 것을 막기 위해 불확실하고 애매한 상황을 퍼지추론을 통한 설비상태를 제시할 수 있는 R-IFEM(Real time Intelligent Fuzzy Equipment Management)전문가시스템을 제안하고자 한다[4].

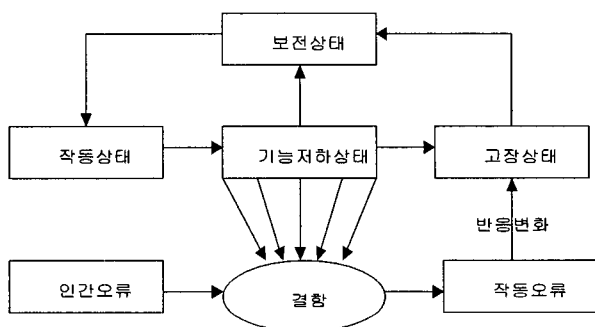
이것은 추출된 정보를 IF-THEN 형식으로 규칙화하여 규칙베이스(Rule-base)를 구성하고 현상상황에 적합한 규칙을 찾아 실시간적으로 작업자나 관리자에게 정보를 알려주는 것이다.

본 연구의 실험은 가성소다를 생산하는 화학회사를 대상으로 하였으며, 하드웨어 구성은 저렴하고, 쉽게 구할 수 있는 부품으로 선정하였으며, 소프트웨어는 사내에 있는 컴퓨터를 활용하여 Window 운영체제와 MS-Visual Basic Ver 6.0 그리고 MDB를 사용하였다.

2. 설비보전과 관리의 고찰

2.1 설비보전의 개요

<그림 1>에서 구성요소는 고장이 아니라 결함에 의한다고 할 수 있다. 만약 기능저하상태가 측정되어질 수 있고 탐색 가능하다면 설비 고장이 발생될 수 있는 기능 저하상태에 도달하기 전에 사전조치 및 개량보전 활동이 수행되어 질 수 있을 것이다.

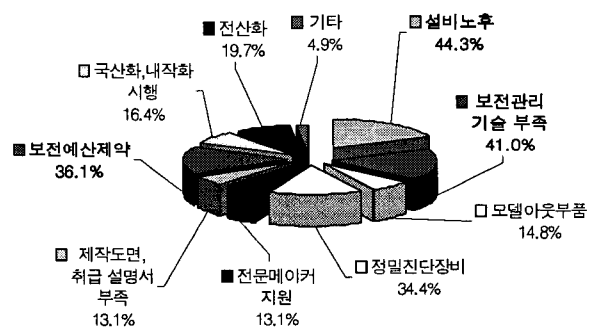


<그림 1> Machine Performance Status

설비 이상상태로 인한 안전사고와 생산라인의 가동 중단은 생산성 저하의 가장 중요한 원인이다. 따라서 이상상태로 인한 정지시간을 최소화하고 보전비용과 고장 가능성 등을 고려하여 설비의 이상상태와 어느 시점에 보전작업을 할 것 인가에 대해서는 전문가의 도움이 필요하게 된다. 그러나 전문가라 해도 주관적인 해석이 있어 작업자의 판단을 흐리게 할 수 있다.

2.2 설비가동정보 시스템의 운영방안[2]

고도성장 위주의 경제개발 수확과정에서 산업구조와 생산 환경의 급격한 변화를 겪으면서 복지를 증진시키고 인간존중과 노동의 인간화를 바탕으로 한 보다 안락하고 안전한 생산 활동을 확보 하는데 소홀해 왔었다. 대부분 설비안전사고 발생요인은 공정의 위험성과 설비의 성능을 확보하지 못한 채, 시설의 보수·유지, 안전작업수립, 근로자 안전교육 및 훈련 실시, 안전작업 허가제도 실시 등이 적절하게 이루어지지 못했기 때문이다.



<그림 2> 보전업무 수행 관리상 애로점

설비관리실태분석에 의하면 설비보전 업무수행에 있어서 <그림 2>와 같이 설비에 관련한 직접적인 관리부족이 매우 높았으며, 특히 업종별로 보았을 때 장치산업에서 설비보전기술이 취약하다.

본 사례연구 업체에서도 전산화, 국산화, 자체기술력, 전문메이커 지원부문의 애로사항을 나타냈다. 그러나 모델아웃 부품, 제작도면 및 취급설명서 부족 등은 다소 줄어들어 점차 안정화되어 가고 있는 추세다[9][11].

3. R-IFEM 시스템 고찰

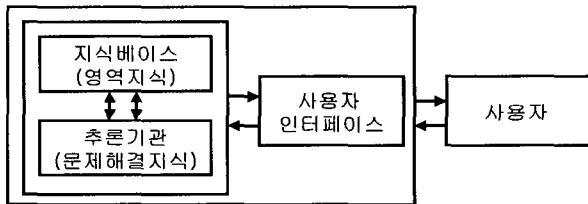
3.1 전문가시스템의 개요

전문가시스템은 대상영역에 대한 전문가의 지식을

지식 베이스로 축적하여 고도의 문제를 취급하는 시스템을 말하며, 전문가의 지식으로 구성된 지식 베이스(Knowledge Base), 정보 입출력과 추론엔진(Inference Engine)으로 구성되어 있다[8].

3.1.1. 지식베이스에 의한 전문가 시스템

<그림 3>에서 지식베이스 시스템(Knowledge- Based System)의 구성이다. 인간전문가의 지식을 컴퓨터를 통해 재구성하고 추론하여 정보를 습득하는 시스템이라고 말할 수가 있다. 또한, 많은 이용자들이 직접 전문가를 만나지 않고도 지식베이스 시스템을 통해 전문가의 전문지식과 문제해결능력을 통해 어려운 문제를 해결할 수 있도록 하는데 그 의미가 있다고 본다.



<그림 3> 지식베이스에 의한 전문가시스템 구조

3.1.2 사례기반 추론에 의한 전문가시스템

새로운 문제를 해결하는데 과거 문제의 유형을 분석하고 해결하기 위하여 사용된 문제해결 과정을 인용하고자 하는 새로운 문제해결 기법이다.

사례란 속성과 특징 그리고 특정상황과 그와 관련된 결과들의 집합이다. 따라서 사례는 규칙과 달리 상황 의존적인 특성이 있다. 이러한 사례를 저장한 사례베이스(case-base)의 전문가시스템은 지식베이스(knowledge base)처럼 사례기반추론 시스템의 추론을 위한 과거의 해로부터 현재의 문제에 대한 보다 창의적인 해를 유도할 수 있는 전문가시스템이다.

3.2 퍼지이론

1절에서 말한 전문가시스템은 기준에 저장된 정보를 이진논리(Yes, No)에 의해 전문가의 지식을 추론함으로써 사람의 판단과 유사한 결과를 나타내었다. 그러나 전문가가 다루는 지식 중에는 불완전하고 부정확하여 논리적 추론을 적용하기에 부적당한 경우가 많다. 기준이 애매하여 수치화하기에 어려움과 실세계에 불확실성이 발생하는 상황은 많이 볼 수 있다. 이처럼 불완전하고 불확실한 상황에 대한 지식을 일반화 또는 근사화하여 추론 할 수 있는 퍼지이론을 이용한 퍼지제어 방법이 있다.

3.2.1. 퍼지제어 고찰

L.A Zadeh 교수에 의해 제안되어 불확실한 실세계의 상황을 다루는 다양한 분야에서 사용되고 있다. 전체집합 X에 대한 퍼지부분집합 A는 다음과 같은 소속함수

$$\mu_A(x) : X \rightarrow [0, 1]$$

에 의한 집합이며,

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\}$$

와 같이 표현된다.

<표 2>와 같이 인간의 언어변수에 대한 언어값(linguistic value)과 이 언어값이 차지하는 정도를 0과 1 사이의 실수값으로 표현한 소속함수(membership function)를 다루게 된다[5][7].

<표 2> 위험요인에 대한 언어적 표현의 소속함수

퍼지언어변수	소 속 함 수						
	0	0	0.1	0.3	0.7	0.9	1
high	0	0	0.1	0.3	0.7	0.9	1
medium	0	0.2	0.7	1	0.7	0.2	0
low	1	0.9	0.7	0.3	0.1	0	0
unknown	1	1	1	1	1	1	1
undefined	0	0	0	0	0	0	0
more or less high	0	0	0.3	0.5	0.7	0.7	1
very high	0	0	0	0.1	0.5	0.8	1
very very high	0	0	0	0	0.6	0.9	1
likely	0	0.1	0.5	0.7	0.9	1	1
unlikely	1	1	0.9	0.8	0.5	0	0
not likely	1	1	0.5	0.3	0.1	0.1	0

상태요인을 언어적으로 표현하기 위해 소속함수는 [0, 1] 사이의 값으로서, 요소의 소속 값이 높을수록 집합에 더 소속한다. 제시된 언어변수의 의미가 개인적 해석에 의한 것이지만 설비상태진단분야의 전문가의 정보를 통하여 관련된 언어정의의 정확성을 확장시키면 주관적 차이는 해소할 수 있다[12][14].

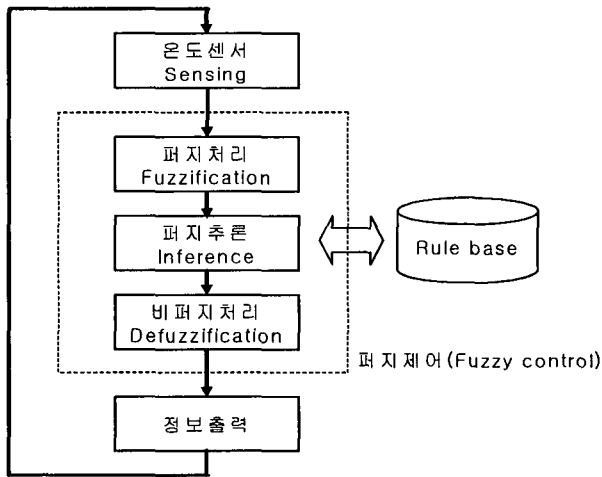
퍼지조건문과 합성규칙을 이용한 추론법을 바탕으로 다음의 퍼지 조건문; 'IF A THEN B 또는 $A \rightarrow B$ '에서 퍼지변수 A와 B의 퍼지관계를 나타낸다. A에 의해 추론되는 퍼지부분집합 B는 최대-최소곱에 의해 결정된다. 예를 들면, 발생온도='high' 그리고 주변온도의 관계가 주어지면, 추론의 합성규칙을 이용하여 고장이나 위험수준을 알 수 있다. 불확실성이 시스템에 적게 포함될 경우는 전통적 설비진단 접근방법이 적용하기가 편리할

것이며, 반대로 불확실성이 많이 포함되어 있는 경우는 퍼지접근 방법이 바람직 할 것이다[13].

3.2.2 퍼지제어 설계

오늘날 자동화 시스템의 개발 증가 추세를 보면 인터넷을 통한 원격관리, 컴퓨터시스템의 고성능화로 인공지능 기술과 센서기술과 전자부품의 급진적인 발달로 이러한 기술을 접목하여 적용하고자 하는 사례가 증가하고 있다.

이것은 제어시스템을 얼마나 효율적으로 하드웨어와 소프트웨어 그리고 제어방법을 하느냐에 따라 시스템의 성패가 있다고 할 수 있다.



<그림 4> R-IFEM 블록도 및 순서도

<그림 4>는 R-IFEM을 구현하는 블록도이면서 순서도 설명이다. 먼저 입력변수에 해당하는 온도센서 정보를 퍼지화를 한다. 퍼지논리에 의한 명확한 값으로 측정된 정보도 적절한 소속함수에 의한 퍼지값으로 변환한다. 온도센서에 측정된 정보는 전체 스케일을 규칙과 추론하기에 적절한 집합으로 바꾸는 것이다. 다음에 퍼지제어 규칙(fuzzy control rule base)작성, 퍼지제어의 핵심과정인 퍼지 추론(fuzzy inference)을 거치게 된다. 마지막으로 추론결과로 퍼지 집합을 적용시스템에 적용하는 과정으로 소속도함수를 통한 비퍼지화 단계를 이룬다[1].

4. R-IFEM 구현 적용

대부분의 장치산업기업은 설비의 대형화, 자동화, 설비보전비용 상승 및 보전전문 인력 부족 현상 등의 문제해결과 다양하고 많은 설비보전데이터를 일관성 있게

유지, 관리할 수 있는 효율적인 시스템이 요구된다. 본 연구에서는 대상업체의 가성소다를 생산하는데 중요한 설비인 원재료 유입 펌프 전동기를 대상으로 하였다.

서론에서 제시하였듯이 전문인력과 관리시스템이 부족한 기업을 대상으로 실시간 현장정보처리와 퍼지제어구조에 의한 상태정보를 구현하는 시스템으로 생산, 품질 및 안전관리 향상으로 생산성을 높이는데 목적이 있다.

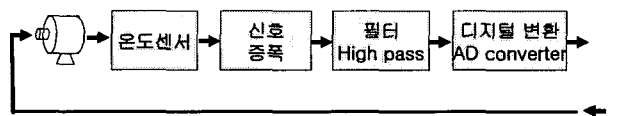
R-IFEM의 상태관리시스템의 구현절차를 보면,

- 1) 설비상태진단 방법에 관한 이론적 접근방법의 비교 및 검토-> Thermo 센서선택
- 2) 선택된 pilot 설비에 맞는 설비상태진단 방법의 선택 및 개선-> 아날로그에서 디지털정보 변환
- 3) 설비상태진단 시스템의 구축을 위한 개발 시스템과 하드웨어의 비교 및 선택->PIC 프로세서
- 4) pilot 설비설치 및 가동, 그리고 설비상태분석-> 24시간 교행운행
- 5) simulation의 결과를 이용한 prototype 설비상태진단시스템의 개발
- 6) 실제실험을 통하여 설비상태진단시스템의 개발
- 7) 운전과 설비상태진단에 관한 문헌으로부터 프로그램에 적용될 진단지식의 수집 및 정리->Rule base 구축
- 8) simulation과 pilot 설비를 이용한 시스템의 평가 및 보완
- 9) 실제 적용 가능한 설비상태진단시스템의 완성
- 10) 향후 공정의 진단 시스템의 완성 및 일반적 진단 시스템 개발

본 연구의 시스템 개발은 우선 시스템 도입을 하려는 설비의 특성을 파악하는데 있고 특성에 따른 데이터 수집과 프로그램으로 컴퓨터 관리할 수 있는지를 파악한다.

4.1 퍼지화과정

<그림 5>는 퍼지제어단계를 가기위한 소속함수 전처리 단계인 신호처리 하드웨어 블록도이다.



<그림 5> 신호처리단계 블록도

전동기를 빈번하게 기동, 정지하거나, 회전 방향을 바꾸거나, BRAKE 장치에 의해 순간 정지를 빈번하게 반복하면 전동기의 온도 상승과 함께 고장발생이 더욱 높아지며 전동기의 수명이 짧아지게 된다. 전동기 몸체에 온도센서를 부착하여 발생하는 온도를 측정하여 주

위 온도와 함께 퍼지제어로 보내진다.

온도측정 센서는 150℃까지 측정 가능한 형 열전대를 사용하였고, 미세한 온도신호를 증폭하기 위한 LM324와 RC회로에 의한 필터를 거쳐 PIC16F877를 사용하여 DC 전압값을 온도값으로 변환한다. 이러한 변환과정을 AD Converting이라 한다. 물리적 변화값(무게, 온도, 길이, 압력 등)은 컴퓨터와 같은 전자장치가 직접적으로 알 수 없기 때문에 아날로그 신호를 '0'과 '1'의 조합으로 된 bit 값으로 처리해야 알 수 있기 때문에 반드시 변환장치를 거치게 된다.

실험 적용한 변환장치의 분해능(Resolution)은 10비트이다. 즉 처리할 수 있는 온도범위가 0에서 100℃사이를 측정한다면 1024등분으로 나누어 예를 들어 실제온도가 25℃일 때는 신호처리값은 256값이 되고, 50℃는 512값으로 대략 0.1℃간격으로 온도를 측정한다. 그래서 분해능이 높으면 온도값을 정확히 알 수 있지만 가격도 비싸고, 향후에 호환성 문제와 함께 기업에서 유지, 관리 면에서 저렴하면서 일반적인 것으로 택하였다.

4.2.2 퍼지추론엔진 설계

퍼지추론 엔진에서는 센서정보를 주의와 위험 그리고 정상 등의 표현방법으로 분류하고, 수명예측 및 설비 이상 유무를 조기에 발견하여 조치를 취할 수 있는 알고리즘 설계이다. 이렇게 컴퓨터를 이용한 감시관리시스템은 항상 설비상태신호를 실시간으로 DB에 저장하여 현재 설비가동상태의 경향과 설비 상태점 파악 등 설비 이상의 원인분석을 할 수 있게 한다. 그리고 원인결과에 따른 조치사항을 동시에 입력하여 추론값과 함께 출력하면 관리자나 작업자가 판단하는데 확신을 줄 수 있다.

<표 3> Rule base 설계

전동기온도 주변온도	정 상	중 간	높 음
낮 음	정상가동	정상가동	주의운전
보 통	정상가동	주의운전	경고운전
높 음	주의운전	경고운전	경고운전

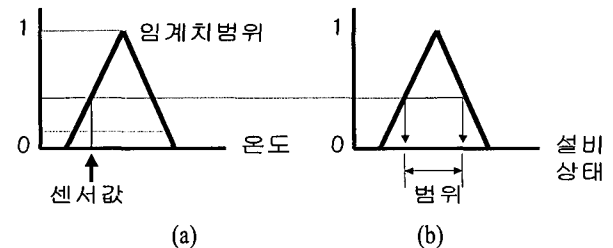
<표 4> If-Then 규칙

Rule 1 : If "x1 is A1" and "x2 is A1" Then "u is B1"
 Rule 2 : If "x1 is A2" and "x2 is A2" Then "u is B2"
 .
 Rule n : If "x1 is An" and "x2 is An" Then "u is Bn"

이러한 온도와 같은 정보를 퍼지소속함수로 처리하여 설비상태의 정보를 퍼지언어값으로 표현하는 것이 추론

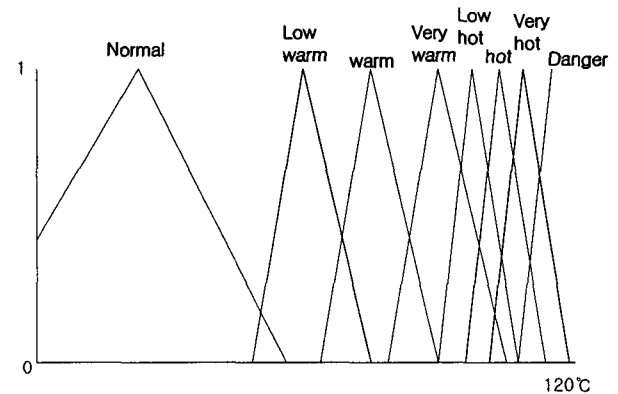
엔진이다. 일반적인 추론방법으로 각 설정값에 따른 정보를 <표 4>와 같은 If-Then 규칙에 의해 가동상태를 알 수 있다.

즉, x1과 x2는 현장의 온도변수가 되고, A 변수는 온도 값, u는 퍼지추론의 결과를 저장하는 변수가 되며 B 변수는 지시값을 나타낸다. 예를 들어 소속함수가 <그림 6>과 같다면 (a)는 센서온도값이 x축상에서 x1, x2의 변수가 되고, y축상의 값은 (b)의 그래프와 같이 상태에 따른 B의 값을 규칙으로 표현한다. 그래서 범위를 좁게 하고 측정값을 판별하는 것을 많이 하면 규칙수도 많이 늘어나게 된다.



<그림 6> 퍼지추론 상태범위

본 연구에서는 삼각형 퍼지집합을 이용한 min · max 추론방법으로 <그림 6>과 같은 퍼지추론 규칙에 따라 <그림 7>에서와 같이 각각의 소속함수에 따른 규칙수를 정하기 위한 것으로 온도가 높아갈수록 소속함수를 많게 하여 경고의 종류를 늘려서 작업자에게 지시하는 내용을 더 정확하게 알려줄 수 있도록 한다.



<그림 7> 온도값에 대한 소속함수

4.2.3 비퍼지화 단계

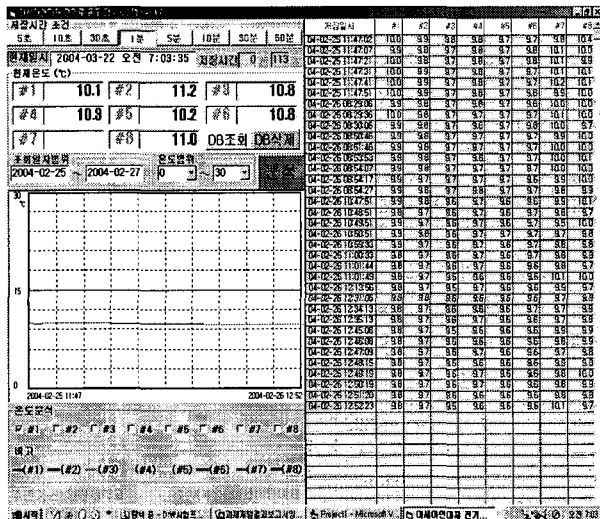
실제로 센서는 150℃까지 측정 가능하지만 전동기가 120℃가 되면 전동기가 가동중에 과열되어 위험한 상황이 된다. 그래서 120℃가 되기 전에 위험상황을 제거할 수 있는 퍼지규칙을 <표 5>의 관계를 <표 4>의 규칙을

프로그램 알고리즘으로 하여 <그림 8>과 같은 가동상태 모니터링 모델을 만들었다.

설계한 시스템 모델은 Window 운영체제에서 가동되며 프로그램은 MS-Visual BASIC 6.0으로 설계하였으며 MDB 7.0(Microsoft Database)로 파일 설계하여 구축하였다. 8대의 원료탱크의 유입펌프를 동시에 저장하며 가동 상태에 따른 상태를 출력할 수 있도록 하였으며, 컴퓨터 간의 네트워크로 연결하면 원거리에서도 현지의 가동상황을 모니터링 할 수도 있다.

<표 5> 신호증폭값, A/D 분해값과 실제온도 관계

신호증폭 (DCV)	bit	AD value	온도 (°C)	퍼지소속함수에 따른 상태정보
0	0000000000	0	20	normal
:	:	:	:	
1	0011001101	205	46	normal & low warm
:	:	:	:	
2	0110011010	410	72	warm & high warm(warning)
:	:	:	:	
3	1001100111	615	98	hot & very hot
:	:	:	:	
4	1100110100	820	124	danger
:	:	:	:	



<그림 8> R-IFEM system 화면

퍼지소속함수에 의한 퍼지추론규칙에 의해 실시간 설비 가동상태 모델을 운영하면 현재상황이 애매하거나 불확실한 상황을 추론엔진에 의해 객관적인 상태로 표현되

여 상황을 모르는 비전문가라도 설비의 이상 상태를 판단하여 관리하고 운영할 수 있다.

또한 이러한 가동과 비가동에 따른 감시 및 진단기능은 설비보전관리 시스템과 연계하여 설비 이력관리를 동시에 처리하게 된다. 그래서 고장에 따른 가동정지로 인해 발생하는 품질불량, 작업자와 설비의 안전결함으로 인한 재해 등의 생산성 저하를 막을 수 있을 것이다.

5. 결론 및 향후과제

오늘날 현장에는 컴퓨터에 의한 자동화를 지향하고 있어 고도화된 설비의 효율적 운영을 위해 설비예비 및 보전시스템의 도입은 필수적이다. 특히, 설비의 성능이 향상될수록 보전시스템의 기능이 강화되고 경험이 풍부한 전문가의 역할은 더욱더 증대되고 있다. 그러나 전문가가 가지는 주관적인 한계성 때문에 컴퓨터를 통해 전문가의 지식을 이용하려는 다양한 노력들이 이미 전개되고 있다. 더욱이 현장에서 발생하는 상태정보는 불확실한 상황이 대부분을 차지하고 있기 때문에 수학적인 모델로서는 많은 오류를 유발시킬 수가 있다.

이러한 노력의 일환으로 사용되는 전문가시스템(Expert System)은 전문가가 지닌 전문지식과 경험을 컴퓨터에 구축하고 퍼지추론을 통해 전문가와 동일한 의사결정을 내릴 수 있도록 컴퓨터 시스템은 다양한 분야에서 폭넓게 연구되고 있다.

또한 실시간 모니터링기법을 통해 얻은 신호데이터를 분석하여 시스템상태를 진단하고, 작업자 및 관리자에게 언제 어떻게 보전업무가 추진되어야 하는지에 대한 정보를 제공해 주게 될 것이다.

그밖에, 앞으로 연구되어야 할 사항을 보면 다음과 같다.

- 1) 인간과 기계간의 향상된 정보교환 인터페이스 연구
- 2) 기계와 컴퓨터와의 향상된 정보교환 인터페이스 연구
- 3) 실시간 정보처리를 위한 고속 정보처리 연구
- 4) 고장원인이 될 수 있는 다른 분야의 신호데이터와 결함간의 관계 규명에 관한 연구
- 5) 정확한 고장시간 예측을 위한 신뢰성 있는 분석 알고리즘 기법 연구
- 6) 결함발생으로 판정할 시스템상태 최적 임계치의 최적결정문제와 비용분석
- 7) 연속적으로 연계 되는 수많은 데이터를 어떻게 평활 시켜 일정구간의 대표값으로 설정할 것인가에 관한 연구 또는 통계학적으로 신호데이터의 모형화로 예지보전에 적용에 관한 연구

참고문헌

- [1] 김길동, “자료 구조 형태에 따른 퍼지 안전진단 전문가 시스템 개발”, 동국대학교 대학원 박사학위 논문, 1997.
- [2] 박소부, “국내 제조업체 설비관리 실태조사보고서”, KMAC, 1988.
- [3] 박주식, “고장진단을 위한 퍼지 전문가시스템의 개발”, 인천대학교 석사학위논문, 1998.
- [4] 송원섭, “생산효율화를 위한 설비보전관리 지원시스템에 관한 연구”, 전북대학교 대학원 박사학위논문, 1997.
- [5] 유동선, 이교원, “기초 퍼지 이론”, 교우사, 개정증보판, pp3-12, 1998.
- [6] 정영득, “퍼지이론에 따른 설비안전정보 전문가 시스템에 관한 연구”, 명지대학교 대학원 박사학위 논문, 2001.
- [7] 채석·오영석, “퍼지이론과 제어”, 청문각 출판사, pp163-180, 1995.
- [8] 최승영, 김선호, “지식베이스를 이용한 천장크레인 의 전기고장 진단 및 처방시스템 개발”, 대한산업공학회, 20(1), 1994.
- [9] 한국산업안전공단, “안전정보시스템 개발 I·II”, 1996.
- [10] 한국생산성본부, “자동화 설비의 활용 실태”, pp12-19, Automation, 2월호, 1991.
- [11] 한국산업안전공단, “제조업종의 위험성평가 제도 도입에 관한 연구”, 1997.
- [12] Brown, C. B. “A Fuzzy Safety Measure,” *J. Eng. Mech. Div.*, 5, pp855-872, 1979.
- [13] Mamadani, H. E., “Advances in the Linguistic Synthesis of Fuzzy Controllers,” *Int. J. Man-Machine Stud.*, 8, pp669-678, 1976.
- [14] Zadeh, L. A., “A Fuzzy Algorithmic Approach to Definition of Complex and Imprecise Concepts,” *Int. J. Man-Machine Stud.*, 8, pp249-291, 1976.