

# 가스터빈용 듀얼타입 온도센서의 고장검출을 위한 퍼지로지 기반의 진단 알고리즘 개발

한영복\* · 김성호\*\* · 김변곤\*\*\*

## Development of Fuzzy Logic-Based Diagnosis Algorithm for Fault Detection Of Dual-Type Temperature Sensor for Gas Turbine System

Young-Bok Han\* · Sung-Ho Kim\*\* · Byon-Gon Kim\*\*\*

### 요 약

최근 신재생에너지 증가로 인하여 가스터빈 발전기는 양질의 전력공급을 위해 일일 기동·정지가 지속되고 있으며 이에 따른 영향으로 고온부품의 수명이 단축되고 고온 측정용 온도센서의 고장발생 빈도가 높아지고 있고 있다. 이에 본 연구에서는 가스터빈 제어에 사용되고 있는 듀얼 온도센서가 고장이 났을 경우 센서의 고장을 정확하게 진단하고 체계적으로 검출할 수 있는 퍼지로지 기반의 고장진단 알고리즘을 제안하였으며, 제안된 알고리즘의 유용성 확인을 위해 Matlab/Simulink의 환경에서 다양한 시뮬레이션을 수행함으로 제안된 알고리즘의 유용성을 확인하고자 하였다.

### ABSTRACT

Due to the recent increase in new and renewable energy, gas turbine generators start and stop every day to supply high-quality power, and accordingly, the life span of high-temperature parts is shortened and the failure of combustion chamber temperature sensors increases. Therefore, in this study, we proposed a fuzzy logic-based failure diagnosis algorithm that can accurately diagnose and systematically detect the failure of the sensor when the dual temperature sensor used for gas turbine control fails, and to confirm the usefulness of the proposed algorithm We tried to confirm the usefulness of the proposed algorithm by performing various simulations under the matlab/simulink environment.

### 키워드

Fuzzy control, Temperature sensor, Fault diagnosis, Inference function, Automatic conversion, Signal converter  
퍼지제어, 온도센서, 고장진단, 추론함수, 자동절환, 신호변환기

### 1. 서 론

발전 플랜트에서 사용되는 계측기는 단위기거나 배관 등에 부착된 상태에서 데이터를 취득하고 측정값

을 전송하여 공정의 상태를 감시하고 제어하는데 사용되고 있다. 화력발전소에서 사용되고 있는 계측기는 내구성이 높은 제품으로서 주로 압력과 온도, 레벨, 유량 등을 측정하며 설치수량은 표 1과 같다.

\* 군산대학교 전자정보공학부(hyb0411@naver.com) · Received : Jan. 14, 2023, Revised : Jan. 30, 2023, Accepted : Feb. 17, 2023

\*\* 교신저자 : 군산대학교 전자정보공학부

\*\* Corresponding author : Sung-Hoo Kim

· 접수일 : 2023. 01. 14

School of IT Information & Control Engineering, Kunsan National University

· 수정완료일 : 2023. 01. 30

Email : shkim@kunsan.ac.kr

· 게재확정일 : 2023. 02. 17

가스터빈에 사용하는 계측기 중 약 30%가 온도센서이며 주로 듀얼타입의 측온저항체나 열전대이다. 연소온도는 K 또는 N타입 열전대를 사용하고 있지만 고온과 고 진동 등으로 인해 타 발전설비에 비해 수명이 짧고 고장도 많이 발생한다.

표 1. 복합/기력 발전소 계측기 운용 일반현황  
Table 1. Combined/Thermal power plant instrument status

Volume	Type	Press.	Temp.	Level	Flow	SPD/Vib.	Actuator	Etc	Sum
500MW	C/C	296	398	70	46	89	192	165	1,256
500MW	T/P	708	640	107	121	238	343	308	2,465
1000MW	T/P	809	661	85	202	368	291	757	3,173

F급 가스터빈은 1,300℃ 정도의 화염을 이용하여 터빈을 회전시켜 전기를 생산하고 있는데, 고온 고압의 위험성 때문에 설정온도 대비 편차가 발생할 경우 발전기가 자동으로 정지되도록 구성되어 있지만, 간헐적으로 연소온도 측정오류로 인해 대형사고로 이어지는 사례도 발생하고 있다.

가스터빈의 온도센서 고장대책과 관련된 연구로는 글라스 메탈 쉴 커넥터 및 스토퍼 시스용접을 적용하여 센서의 내구성을 향상시키거나, 인공지능과 빅데이터를 활용한 건전성 예측관리로 예지정비를 수행하는 방안, 비선형 NARX 모델과 칼만추정기를 적용하여 고장진단을 하는 방법 등이 제안되었다[1-3].

그러나 이들 연구는 대부분 온도센서의 구조개선이나 수명예측 또는 신호잡음에 의한 결함 등을 개선하는 방법에 관한 것으로 가스터빈 온도센서의 고장이 발생하였을 경우 안정적인 운전 측면에서는 미흡하다.

이에 본 연구에서는 듀얼타입의 온도센서가 사용되고 있다는 점에 착안하여 듀얼타입의 온도센서로 부터의 측정신호를 동시에 받아 들이고, 이를 센서값을 기반으로 어떠한 센서가 고장이 발생하였는 지를 검출하고, 고장으로 판단된 센서 데이터는 자동적으로 제어에 사용하지 않게 함으로써 가스터빈이 정지되지 않고 효율적인 제어가 가능케 하는 퍼지로지 기반의 듀얼타입 온도 센서의 고장진단 시스템을 제안하고 제안된 기법의 유용성 확인을 위해 다양한 시뮬레이션 고찰을 수행하고자 한다.

본 논문의 2장에서는 기본 퍼지로직의 구성요소에 관해 기술하고 3장에서는 듀얼 온도센서의 동작 특성에 대해 기술하며 4장에서는 듀얼온도 센서의 고장진단 시스템 및 알고리즘에 대해 기술한다. 또한 5장에서는 제안된 알고리즘의 유용성 확인을 위한 다양한 시뮬레이션을 수행하고 6장에서는 결론을 맺는다.

## II. 퍼지제어 시스템

### 2.1 퍼지시스템 구성

퍼지제어기는 기본적으로 입력 데이터를 퍼지 데이터로 변환하는 과정인 퍼지화, 전문가의 지식을 바탕으로 입력간의 규칙을 설정하는 룰 베이스, 퍼지화된 다수의 입력 데이터를 하나로 합치는 과정인 추론엔진, 퍼지화로 표현된 데이터를 숫자로 변환하는 과정인 비퍼지화로 구분할 수 있다.

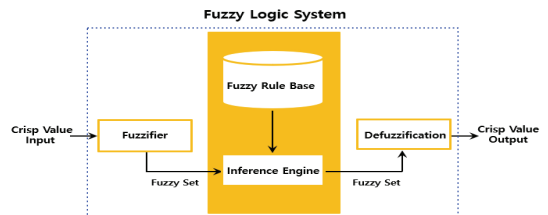


그림 1. 퍼지시스템의 블록 다이어그램  
Fig. 1 Block diagram of a fuzzy system

그림 1은 퍼지제어기의 기본적인 구성요소 및 프로세스를 간단하게 표현한 블록도로서, 실제의 입력변수가 퍼지화에 입력되면 0과 1사이의 값으로 변환하여 퍼지 추론엔진에 전달된다. 추론엔진에서는 퍼지규칙 베이스에 의해 추론과정을 수행한 후 신호를 비퍼지화에 보내서 실제 제어대상 시스템에 적합한 출력을 내보내는 역할을 한다. 퍼지제어는 비선형성이 강한 복잡한 시스템에 효율적으로 적용될 수 있다는 장점이 있지만 퍼지시스템의 핵심인 룰 베이스는 직관적으로 구하기가 어렵다는 적용상의 문제점을 갖는다. 그러나 본 연구에서 고찰하는 듀얼 온도센서의 고장검출을 위한 룰 베이스는 온도 제어시스템 운영자로부터의 경험적 지식을 통해 온도센서의 고장과 관련된 진단 규칙을 구할 수 있다[4].

## 2.2 퍼지파이어(Fuzzifier)

퍼지파이어는 제어시스템에서 측정된 Crisp 입력값을 퍼지규칙에 의해 각각의 언어적인 값과 소속함수(Membership function)로 변환하는 과정으로서, 입력된 변수의 값을 측정하고 입력변수의 영역을 전체 집합 범위에 맞도록 크기를 변환한 후 여러값이나 정상적인 값 등을 적절한 언어적인 퍼지값으로 변환시키는 과정이라고 할 수 있다.

퍼지 입력변수에 따른 소속함수의 개수는 퍼지규칙(Fuzzy rule base)과 연관성이 있으며, 많은 소속함수를 사용하면 더 정밀한 제어를 할 수 있으나 계산하는데 많은 시간이 소요되고 복잡해진다. 따라서 최적의 효과를 얻을 수 있는 적절한 소속함수의 개수를 선정하는 것이 매우 중요하다.

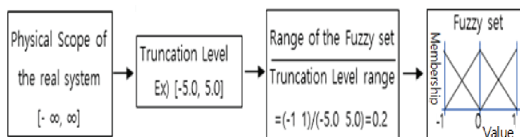


그림 2. 퍼지파이어의 구성 및 흐름도  
Fig. 2 Fuzzyfire configuration and flow chart

그림 2는 실제의 물리적인 시스템 상태의 퍼지화 과정을 흐름도 형식으로 표현한 것으로서, 실제 시스템의 모든 상태에 대해 고려해야 할 물리적인 범위와 상·하한값을 결정하는 Truncation level이 있고 물리적인 범위를 퍼지집합으로 판단시키는 Scaling Factor의 설정이 있다.

퍼지집합은 언어의 애매함을 0과 1사이의 값으로 나타낸 집합개념으로서 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$A = (x \cdot uA(x)) / x \in X \quad (1)$$

여기서  $uA(x)$ 는 퍼지집합에 대한 소속함수라고 부르며 집합의 소속 정도를 나타낸다[5].

소속함수에는 삼각함수(Triangular MF), 가우스함수(Gaussian MF), 사다리꼴함수(Trapezoidal), 종형함수(Bell MF) 등을 주로 사용한다. 소속함수 중에서 삼각함수나 사다리꼴함수는 계산이 편리한 장점이 있으나, 비선형성을 정확히 반영하기 어렵고, 가우스나 종형함수는 비선형성을 반영하기 쉬우나 계산이 비교적 복잡하다는 단점이 있다.

## 2.3 퍼지 추론기(Fuzzy Inference Engine)

퍼지 추론기는 퍼지화기에서 변환된 언어값을 퍼지규칙에 의하여 목표값을 발생하는 시스템 제어기로서, 퍼지화된 입력값과 퍼지규칙을 기반으로 출력값을 적절하게 추론하는 논리연산의 부분이다.

추론엔진에서는 Mamdani형은 주로 전문가의 지식을 얻는데 쓰이는 추론기법으로서 가장 많이 사용하고 있으며 퍼지추론 과정은 입력변수의 퍼지화, 규칙 평가, 출력값의 규칙통합, 역퍼지화 등으로 진행된다. Sugeno형은 Mamdani형과 유사하지만 입력변수에 수학적함수를 사용하기 때문에 계산을 효율적으로 할 수 있고 최적화나 적응형 기법과 호환이 잘되어 주로 동적 비선형 시스템에서 사용된다[6].

퍼지규칙은 시스템의 특성에 따라 적절한 규칙을 생성하는 제어기로서 퍼지집합과의 입력변수와 출력변수들과의 연관된 규칙의 집합이다. 또한 퍼지 제어기의 핵심부분으로서 전문가의 경험이나 지식, 조작자의 조작 모델 또는 프로세스 퍼지 모델 등을 적절히 조합하여 사용한다. 퍼지 모델의 추론형식은 주로 If-then 형태의 언어적 규칙으로 구성하여 적절하게 입·출력 변수를 선정하며 진리표로 간편하게 표현되기도 한다[6]. 퍼지규칙은 함축된 형태로 이루어져 있으며 제어변수가 2개이고 규칙수가 N개일 경우 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R^i : \text{If } x_1 \text{ is } A_i \text{ and } x_2 \text{ is } A_{i2}, \text{ then } B_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, N) \quad (2)$$

여기서  $x$ 와  $y$ 는 언어변수이고,  $A$ 와  $B$ 는 각각 논의 영역  $x$ 와  $y$ 의 퍼지집합에서 결정된 언어의 값이다[7].

## 2.4 비퍼지화(Defuzzification)

비퍼지화는 퍼지파이어의 반대기능으로서 추론과정을 거친 퍼지집합의 출력을 실제 제어값으로 사용할 수 있는 하나의 숫자로 확정된 값으로 변환하는 과정이다. 즉 제어규칙의 최종 추론 결과에서 수평 축의 어느 한 값을 도출해 내는 과정으로 두 개의 사다리꼴이 만들어 내는 추론 결과를 가장 잘 표현할 수 있는 제어신호를 찾아가는 과정이라고 할 수 있다.

비퍼지화기는 무게중심법(Center of gravity method), 평균중심법(Center of average method), 면적중심법(Centor of area) 등이 있는데 무게중심법은 적분값을 계산하는데 시간이 많이 걸리지만 직관적이

고 제어성능과 안정성이 매우 높아서 가장 많이 사용되고 있으며 수식적으로 표현하면 식 (3)과 같다[8,9].

$$y^* = \frac{\int_v y \cdot mB(y) dy}{\int_v mB(y) dy} \quad (mB(y) : \text{출력퍼지집합 소속함수}) \quad (3)$$

평균중심법은 무게중심법과 거의 차이가 없으나 무게중심법의 단점을 보완하기 위해 제시된 방법이며 수식적으로 표현하면 식 (4)와 같다[10].

$$y^* = \frac{\sum_{l=1}^M \int_v y^{-1} \cdot wI}{\sum_{l=1}^M \int_v wI} \quad (y^{-1} \text{은 } l\text{번째 규칙에 의한 출력평균값}, wI \text{는 } l\text{번째 규칙의 적합도}) \quad (4)$$

### III. 온도센서 신호변환 특성

#### 3.1 온도센서 고장특성

온도센서의 측정오차는 센서 타입이나 등급별로 차이가 있지만 일반적으로 산업용에서 사용하는 RTD는 IEC60751의거 Class A급은  $\pm(0.15+0.002|t|)$ ℃ 이고, Class B급은  $\pm(0.3+0.005|t|)$ ℃ 이다. TC는 IEC60584 에 의거 K타입을 기준으로 했을 때 허용오차는 Class 1급은  $\pm 1.5$ ℃, Class 2급은  $\pm 2.5$ ℃이다 [11].

산업용 센서는 제작과정이 까다롭고 수요도 적으며 높은 수준의 품질관리가 요구되기 때문에 일반제품에 비하여 고가이다. 플랜트에서 사용하고 있는 RTD의 수명은 약 20년 정도이지만 취약한 환경에서 사용할 때에는 10년 정도 지나면 정확도가 저하되거나 출력 신호의 왜곡 등이 나타날 수 있다. 또한 TC는 장기간 사용할 경우 응답시간이 지연되거나 측정오차가 커지게 된다. 따라서 가스터빈과 같이 고온과 저온이 반복되는 환경에서 사용할 때는 5년마다 교체하거나 정밀 점검을 해야만 고장을 예방할 수 있고 설비의 신뢰성을 유지할 수 있다.

센서의 고장은 주로 센서 단선이나 절연 파괴, 장기간 사용에 따른 소선의 재질 변형이나 전직작용, 소선의 접합품질 등에 따른 반응속도가 변화되어 오지 시하게 된다. 센서 고장은 설치상태나 운전경향 등을 분석해야만 가능하며 숙련자가 아닌 경우에는 쉽지 않다. 또한 플랜트 설비에서 온도센서는 건설시공 기간을 제외하고는 추가설치가 어려운 상황이며, 온도센

서가 고장이 발생하거나 오지시를 할 경우 공정이 중단되도록 구성되고 있고 상황대처 및 복구지연 등으로 인해 많은 지장을 초래하게 된다. 따라서 제어에 사용되거나 보호회로 동작용으로 사용되는 곳은 2 out of 3의 신호체계로 구성하고 있지만 장소가 협소하거나 건설단가를 낮추기 위해 단일 신호로 구성된 곳도 있다.

#### 3.2 온도신호 변환장치

온도 신호변환기는 RTD나 TC에서 발생된 전기신호를 변환기의 입력에 접속되며 증폭기, 노이즈필터, Isolation, 선형화 등의 신호처리 과정을 거치면서 0.2V~1.0V나 4.0~20mA의 신호로 변환하여 PLC나 DCS으로 보내는 계측기이며 Temp. Transmitter라고도 한다. 산업현장에서 사용하는 신호변환기는 Single 타입의 센서를 4~16개까지 접속하여 신호를 변환하는 제품도 있지만, 주로 공정계통의 안정성 향상을 위해 신호변환기 1개에 센서 1개를 접속하는 제품을 사용하고 있다. 그리고 듀얼타입의 센서일 경우 1채널만 접속하여 사용하고 비 접속된 온도센서는 비정상일 경우 모니터링 또는 대체용으로 사용된다.

따라서 생산 공정에서 단일신호를 사용하는 프로세스에는 기존의 신호전송 시스템과 호환이 되고 별도의 추가 시설이 필요없는 상태에서 듀얼 온도센서 2개 채널 모두를 신호변환기의 입력신호로 수용하여 센서고장을 진단하여 신호를 절체하는 디바이스넷 타입의 온도신호 변환기 개발이 필요하다. 이 신호변환기는 듀얼 온도센서를 사용하고 있는 상태에서 1개 채널의 값이 비정상적인 신호라고 판단되면 신호변환기 자체에서 자동으로 정상적인 채널로 절환되어 온도신호가 중단되지 않고 지속적으로 DCS에 전송되는 방식이다.

### IV. 듀얼 온도센서의 고장진단을 위한 퍼지로지식 시스템

#### 4.1 고장진단 시스템 시뮬레이션 위한 듀얼 센서 데이터 취득

듀얼타입(A, B) 센서에서 측정된 값이 다르게 지시될 때 측정값으로만 고장을 판단을 할 수 있는 알고

리즘을 개발하기 위해서는 센서의 특성이나 고장형태, 출력값 등에 대한 데이터가 필요하다. 따라서 그림 3과 같이 온도센서의 특성을 파악하고 데이터를 저장할 수 있는 시험장치를 구성하였다.

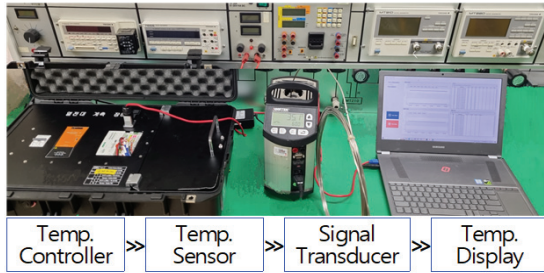


그림 3. 온도센서 특성시험 및 기록 장치

Fig. 3 Temp. sensor characteristic test and recording device

장치에 사용된 온도센서는 신폴센서 3개와 고장센서 6개를 대상으로 10회 실험을 하였으며, 1회마다 0.1sec 간격으로 5분동안 데이터를 취득하였다. 온도센서는 K 타입(Dual센서)의 TC이며, 직경은  $\phi 2.2\text{mm}$  이고 보호관의 재질은 SUS316, 용접형태는 비접지 방식의 시스템이다.

실험결과 고장센서는 정상 대비  $\pm 3.5\%/0.1\text{sec}$  이상 편차를 보이거나 0.6sec 이내에 2회 이상  $\pm 5\%$  이상 편차가 발생하였다. 또한 특정온도를 지시하는데 소수점 3자리까지 변하지 않고 4.9sec 이상 지속되는 경우도 있었다. 열 시정수 측정은 시험 여건상  $15^\circ\text{C}$ 부터 최고 온도까지 걸리는 시간을 기준으로 하였으며 열 기전력의 63.2%에 도달하는데 걸리는 시간을 0.8~1.2sec 이었다. 온도센서 고장유형 별로 특성 파악을 위해 전기로를 이용하여 온도를 빠르게 올리거나 내렸으며, 온도센서를 전기로에서 인출하여 드라이아이스를 이용하여 급냉했을 때의 온도변화까지 확인하였다. 이러한 시험을 거쳐 온도센서가 고장날 수 있는 유형은 교정값 불량 또는 슬리브 오염, 단자조임 불량 또는 노이즈 유입, 센서 열화 또는 제조 결함, 센서의 소선 또는 케이블 열화 등으로 분류할 수 있었다.

### 4.2 고장진단 시뮬레이터 구성

본 논문에서 제안하고자 하는 퍼지로지 기반의 온도센서 고장진단 알고리즘을 발전플랜트의 온도신호

변환기에 적용하는 것은 시스템의 안정성 문제로 쉽지 않다. 따라서 플랜트 운전을 통해 얻어진 온도값 일부를 엑셀 파일로 변환하여 시뮬레이터의 입력 데이터로 사용하였으며 구축된 시뮬레이터 환경은 아래 그림 4와 같다.

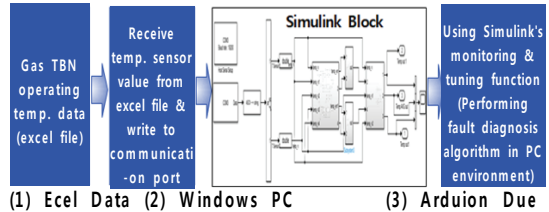


그림 4. 고장진단 알고리즘 시뮬레이터 개발 환경

Fig. 4 Failure diagnosis simulator development environments

블록 다이어그램에서 (1)은 엑셀파일로 실제 발전 플랜트에서 운전된 온도센서 값을 추출한 데이터이며, 이는 Windows PC에서 파이썬으로 작성된 프로그램에서 데이터가 읽혀지고 파이썬 프로그램은 듀얼센서 값을 COM 포트를 통해 (3)으로 표시된 Arudino Due 보드로 보낸다. Arudino Due보드에서는 보드에서 제공하는 COM 포트를 통해 듀얼온도의 센서값을 받아 들여서 설계예정인 퍼지로지 기반의 온도센서 고장진단 시스템에서 사용하게 된다.

또한 Matlab의 Simulink로 퍼지로직을 모델링했기 때문에 파이썬과 Arduino와 데이터를 교환할 수 있는 회로를 구성하였다. 실험에 사용한 컨버터는 Arduino Uno보다 약 1.6배 빠르고 DAC를 사용하여 실제로 전압을 분배해 아날로그 신호로 출력하는 Arduino Due를 사용하였다.

### 4.3 온도값 퍼지 입·출력 멤버십 함수

퍼지 진단 시스템을 구축하기 위해서는 퍼지규칙에서 사용되는 다양한 형태의 멤버십 함수를 정의해야만 추론과정에서 생기는 오류를 최소화 할 수 있다. 따라서 많은 온도센서 중에서 고장진단을 정확히 판별해야하기 때문에 오차가 없는 분포를 최적점으로 판단하기 위해 단일 피크값이 있는 삼각형 멤버십 함수를 사용하였다. 또한 퍼지 진단 시스템에서는 진단 결과를 퍼지변수로 출력해야 하고 특정값 후에도 일



정하게 유지되는 사다리꼴 멤버십을 사용하였다.

온도센서의 고장을 판단하기 위한 퍼지입력 변수 및 멤버십 함수는 그림 5와 같이 4개(T1\_sensor, CET1\_sensor, T2\_sensor, CET2\_sensor)로 구분하여 정의하였으며, 센서에서 측정된 두 개의 온도값이 퍼지 입력값으로 되어 정확성과 부정확성의 소속도를 구한 후에 퍼지제어 규칙을 이용하여 Max-Min 추론 엔진에 의해 센서의 고장진단을 하는 방법을 적용하여 추론하는 형식으로 규칙을 정했다.

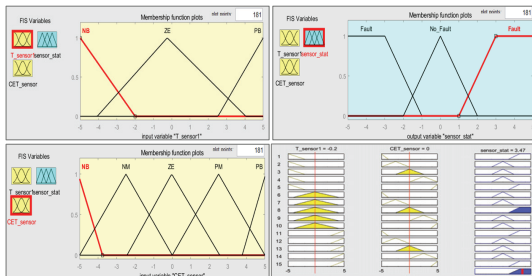


그림 5. 온도신호의 입·출력 멤버십 함수  
Fig. In-output membership function of temp. signal

퍼지 추론 후에는 비퍼지화하여 온도편차가 큰 경우에는 숫자로 높게 나타나고 편차가 없을 때는 0이 출력되도록 하였다. 비퍼지화에는 안정성이 높은 무게중심법을 사용하였는데, 출력값의 최대값과 최소값이 제한되는 경우를 극복하기 위하여 출력 멤버십 함수 중 최소범위와 최대범위의 멤버십 함수 형태를 단일값으로 적용 조정하는 기법을 사용했다.

4.4 센서 고장진단 위한 퍼지규칙 설계

온도센서 고장진단 알고리즘에는 온도 측정값이 최대·최소를 지시하거나, 0.6sec 이내에 큰 폭으로 움직이는 값은 고장센서로 판단되도록 하였다. 또한 정상 센서 값에서 일정 온도범위를 벗어나면 고장으로 판단되 판단기준은 퍼지로직을 통해 두 개의 온도 센서를 비교하여 정상과 고장을 판단하도록 하였다.

퍼지규칙으로는 퍼지소속의 함수로서 각 입·출력 조건 및 퍼지추론기에서 사용되는 모든 입력변수 및 출력변수들이 가지는 값의 구간을 NB(Negative Big), NM(Negative Medium), ZE(Zero Error), PM(Positive Medium), PB(Positive Big)로 5부분으로 나누었다. 또한 멤버십 함수를 이용하여 15개의 규칙으로 구성

된 규칙함수로 출력값이 산출되도록 하였다. 또한 입력값으로 퍼지화 및 퍼지 출력값의 실제 제어량을 구하기 위하여 삼각형과 사다리꼴 형태의 퍼지수를 사용하여 퍼지화 및 비퍼지화 하였으며, 온도센서 고장 진단을 위한 퍼지로직의 진리표 및 퍼지추론 규칙은 아래 그림 6과 같다.

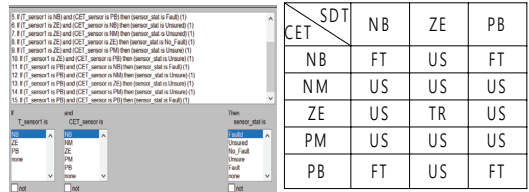


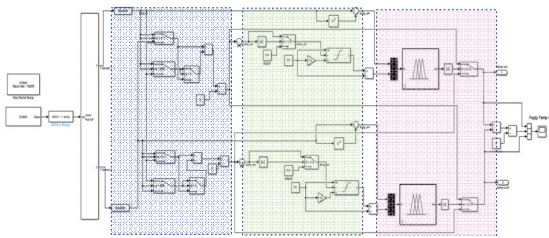
그림 6. 온도센서 고장 판단위한 퍼지추론 규칙  
Fig. 6 Fuzzy inference rules for determining sensors faults

퍼지 추론규칙에서 센서 값의 크기 와 시간편차에 의한 변화를 SDT(Sensor Detecting Temperature)라 하고, 실시간 측정된 A채널과 B채널의 온도편차를 CET(Change Error Temperature)라 했다. 이는 센서 A, B의 입력값에 대하여 이진화를 위하여 임계값을 추출하기 위한 퍼지 제어규칙으로 표현하였으며 약어 FT는 Fault, US는 Unsure, TR은 True 이다. 만약 입력(SDT)가 NB이고, 입력(CET)가 PB이면 출력은 FT가 된다. 추론규칙은 출력 멤버십 함수의 -5와 +5의 중간 값인 0을 기준으로 임계값이 상향 또는 하향 조정하여 수치로 된 값으로 표현되도록 했다.

V. 시뮬레이션 고찰

5.1 센서 고장진단 알고리즘 위한 Matlab/시뮬링크 모델 설계

본 연구에서 제안된 고장진단 알고리즘은 Matlab의 시뮬링크를 이용하여 설계하였다. 고장센서가 다양한 형태일지라도 고장진단의 정확성을 높이고 속련도가 낮은 사용자도 접근성을 높이기 위해 IF Function과 듀얼온도 비교부, 퍼지 제어부로 구분하여 설계하였으며 그림 7과 같다.



(1) IF Function (2) T Compar. part (3) Fuzzy Controller

그림 7. 퍼지로지 기반의 고장진단 시뮬링크

Fig. 7 Fuzzy logic-based sensor fault diagnosis Simulink

회로는 듀얼 온도센서로 부터의 A와 B의 입력값에 대한 편차(Error)와 시간변화(Change of error)를 입력신호로 받아들여 전문가에 의해 생성된 규칙(Rule-base)에 의해 고장센서를 판별하는 로직이다. 기본설계는 듀얼센서에서 출력되는 두 개의 온도신호가 정상적일 때는 고장진단 알고리즘을 거치지 않고 출력값으로 전송되도록 하고, 듀얼센서에서 전송되는 온도값을 실시간 비교하여 1.5℃를 벗어날 경우 온도센서 고장알고리즘의 입력값으로 전송되도록 구성하였다. 이 기준은 IEC60584-2의 등급별 오차 Class1을 기준으로 적용하였다.

퍼지제어 입력값은 파이썬에서 전송되는 온도신호와 온도편차의 값도 퍼지제어 기반의 고장 알고리즘의 입력값으로 전송되도록 설계하였으며, 퍼지규칙을 통해 나온 상수값이 설정된 범위를 벗어나면 퍼지 로직을 통과하지 않은 다른 온도센서로 전환되도록 설계하였다. 또한 고장진단 알고리즘을 개발의 신뢰성과 정확성을 높이기 위해 산업현장에서 취득한 온도 데이터를 고장형태 별로 4가지로 구분하였다. 고장형태 별로 약 18,000Point의 온도값을 파이썬을 통해 시뮬링크 입력값으로 사용하였으며 온도센서 고장형태 및 온도변화 추이는 그림 8와 같다.

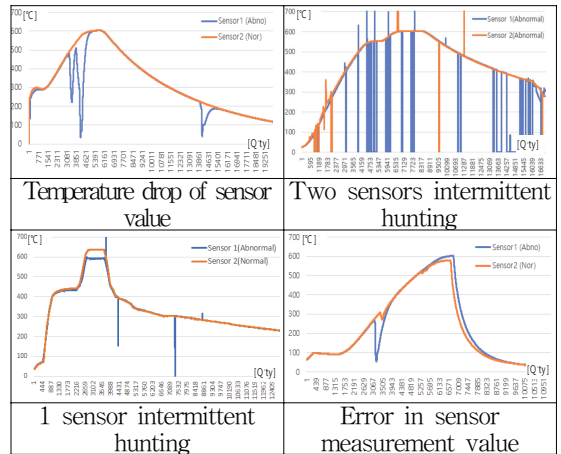


그림 8. 듀얼 온도센서 고장유형별 출력값 형태

Fig. 8 Dual type sensor output value type by failure types

### 5.2 멤버십 함수 및 시간지연 함수 시험

고장진단 시뮬링크 알고리즘에는 그림 8의 첫 번째 형태와 같이 간헐적으로 저하된 온도를 지시하는 형태의 값을 기준으로 하여 온도비교 시간변수 및 퍼지 제어의 멤버십 함수에 변화를 주면서 온도값의 상태를 분석·비교하며 최적화 과정을 진행하였다.

멤버십 함수변화에 따른 퍼지출력 형태 및 온도변화에 대한 시간지연의 특성을 파악한 결과, 그림 9와 같이 나타났다. ①의 온도분포에서는 퍼지출력 멤버십에서 나오는 함수값은 크게 영향을 받지 않았지만 두 개의 온도편차가 크게 변하는 시작점에서 간헐적으로 센서 A, B간의 절환되는 경향을 보였다.

②의 퍼지함수는 온도상승 초기구간에서 센서 A, B가 반복적으로 전환되었으며 온도가 내려가는 구간에서도 유사한 형태를 보였다. ③과 ④는 시간지연도 다르고 Positive Big과 Negative Big의 크기는 다르지만 출력파형은 유사하였고 A, B 전환 횟수도 큰 차이가 없었다.

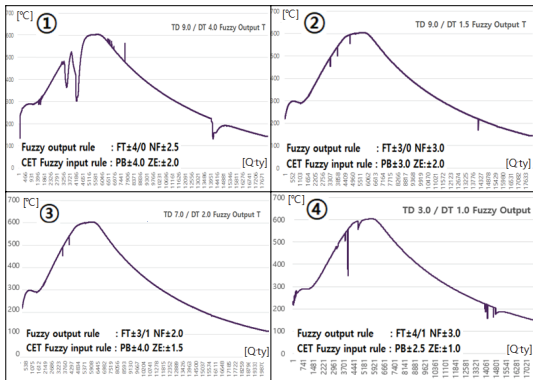


그림 9. 듀얼 온도센서 고장유형별 출력값 형태  
Fig. 9 Dual type sensor output value type by failure types

또한 파이썬의 출력값을 시간지연 함수를 이용하여 온도가 간헐적으로 저하되는 구간의 데이터 3,000point를 0.1sec 간격으로 퍼지로그에 전송되도록 하고 퍼지 알고리즘에 적용결과, 퍼지규칙은 동일한 상태에서 시간지연을 10으로 변경했을 때 측정온도가 심하게 변하는 부분에서 A, B센서 회로 전환이 반복되었지만 비선형구간에서는 상당히 많이 반복되었다. 시간지연을 7로 했을 때는 온도 기울기가 큰 폭으로 변하기 시작하는 부분과 정상으로 복귀하는 구간에서 A, B 수회 전환되다가 정상적인 신호를 추종하였다. 시간지연을 4로 변경했을 때는 측정온도가 내려가는 부분 A, B센서 회로 전환이 반복되었는데 특히 선형적인 구간에서 반복현상이 심하게 지속되었다.

### 5.3 퍼지로그 최적화 조정

모든 조건에서도 정확하고 최적화된 알고리즘 구현을 위해 온도편차의 크기와 시간지연 조정을 통한 온도변화의 기울기 변화와 퍼지로그 출력값의 절체함수를 변경해 가며 퍼지값을 고찰하였다. 또한 정상적인 온도신호만을 출력하기 위해 멤버십 함수 및 무게중심값을 조정해 가며 신호값을 비교 분석해 보았으며, 퍼지 입력변수 및 멤버십 소속함수의 타입도 변경한 결과, 온도값이 비선형적이지만 편차가 천천히 커지는 형태는 고장진단을 정확하게 수행했지만 그림 10과 같이 급격한 온도변동에는 예러가 발생하는 경우가 있었으며 간헐적으로 전환되는 과정에서 소폭의 편차가 발생하였다.

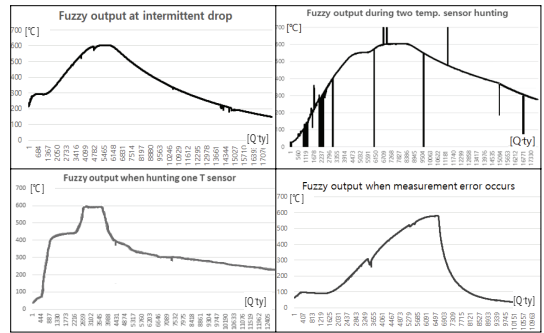


그림 10. 퍼지로그 최적화 후 고장진단 출력결과  
Fig. 10 Fault diagnosis output results after fuzzy logic optimization

또한 고장센서 값이 선형 및 비선형 형태가 혼합되어 있으며 시간지연 형태도 매우 다양한 형태로 고장이 발생하기 때문에 A, B센서 Delay Blocks의 상수값이 서로 다를 경우 패턴 분석이나 수식설정이 어렵고 고장진단을 정확하게 판단할 수 있는 알고리즘 구현은 한계가 있었다.

이러한 현상을 최소화하기 위해 IF Function을 추가하고 퍼지 추론기의 판단기준 범위값을 축소하였다. 또한 시뮬링크에서 시간지연 함수조정부터 퍼지출력값에 따른 정상적인 온도값 전환에 이르기 까지 함수값을 변경시켜 가며 고장유형별 최적의 알고리즘을 확인하였다. 반복된 시험을 거쳐 다양한 상황 속에서도 최적화된 퍼지온도 결과값을 얻기 위하여 멤버십 함수 최대·최소값을 5에서 1로 줄이고 퍼지출력의 고장판단 스위치 동작값도 약 57%에서 86%로 변경하여 시뮬링크 알고리즘을 개선하였다.

### 5.4 고장진단 알고리즘 시험결과 분석

IF함수가 추가된 고장진단 알고리즘을 이용하여 온도센서 고장 형태별 데이터를 입력하며 최적화를 수행한 결과, IF함수가 없을 때 보다 더 정확한 값을 지시하였으며, 온도센서 1개가 급격히 변동할 때에도 정상적인 센서값으로 자동절체는 잘 이루어졌다. 하지만 2개의 센서가 불규칙적으로 크게 변동될 때는 간헐적으로 낮은 온도범위에서 고장센서를 선택하는 오류가 발생하는 경향을 보였다. 이러한 현상을 제거하기 위해 A, B 센서간의 Delay Blocks을 최종적으로 조정하고 퍼지함수 값을 조정하여 온도센서 2개의 값이 불규칙적으로 변동하는 경우와 고장형태가 서서히



편차가 생기는 부분에서 고장진단에 오류가 발생하는 경우를 최소화 하였으며 이에 대한 최종적인 퍼지 출력값은 그림 11와 같다.

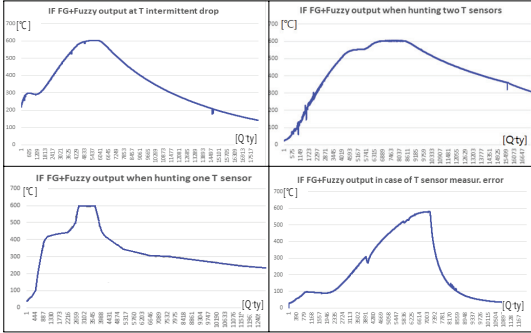


그림 11. IF함수 포함의 퍼지로지 고장진단 출력결과  
Fig. 11 Output results of fuzzy logic fault diagnosis including IF function

시험분석 결과 다양한 고장형태에서도 100% 정확하게 진단하기 위해서는 또 다른 제어방식이 적용되어야 할 것으로 판단되며, 이론이 완벽하지 않고 알고리즘이 복잡할 경우 고장진단 제어프로세스에서 오류가 발생할 수 있다는 것을 실험을 통해 알 수 있었다

### VI. 결론

이번 연구는 온도센서로부터 출력되고 있는 측정값을 실시간적으로 진단한 후, 고장으로 예상되는 센서는 알람과 동시에 출력신호를 중단하고 나머지 한 개의 신호로 자동 절체되는 퍼지알고리즘을 개발하기 위한 연구를 수행하였다.

시험을 통해 얻은 결론은 퍼지로직을 이용하여 고장센서의 기준값이 없는 상태에서 선형성과 비선형성이 포함되어 있고 시간지연이 불규칙한 센서의 값을 퍼지제어로 정형화하고 오차없이 정확하게 고장진단을 수행하는 알고리즘 개발하는 것은 한계가 있었다, 따라서 산업 공정에 꼭 필요한 제어성이나 안정성, 정확성 등의 개념을 기본으로 하여 설계가 이루어지고, 정확성을 높일 수 있는 제어방법을 적용하여 센서값이 예측 불가능한 형태로 입력되더라도 실시간으로 정확하게 진단 가능한 알고리즘 연구가 필요하다고 판단된다[12,13].

플랜트 산업 공정에서는 단순하면서도 고 정밀도와 고 신뢰성이 요구되고 있기 때문에 퍼지제어의 활용빈도가 낮은 편이다. 이러한 이유로 인해 퍼지제어 모델링에 있어서 공정의 언어구조를 모델링하고 동작 데이터를 습득하여 공정에서 요구하는 만큼의 신뢰성을 확보한다는 것은 많은 어려움이 있다. 하지만 좀더 정확하고 산업공정의 연속성을 위해서는 기존에 사용하고 있는 제어기술에 퍼지제어 기술을 상호 연관시켜 시스템을 설계하기 위해서는 많은 연구와 발전이 이루어져야 한다고 본다. 특히 이 분야에서 퍼지논리와 신경회로망 이론의 기술을 조합하여 견고한 시스템으로 개발해 나간다면 산업공정에서 생산품질을 향상시키고 원가를 절감하는데 기여할 것으로 기대된다.

### References

- [1] Chang, Hong “A study on the application of predictive maintenance using artificial intelligence and big data” *Korea Institute for Defense Analysis*, Jul. 2022, vol. 38, no. 2, pp. 197-228
- [2] Kyung, Lee, and Sung, Kim, “Research of Small Gas Turbine Engine Control Logic by Engine Failure Mode Simulation” *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 25, No. 2, Jul. 2021, pp. 88-97.
- [3] Jung, Kim, and Sang, Lee, “Sensor Fault-tolerant Controller Design on Gas Turbine Engine using Multiple Engine Models” *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, vol. 20, no. 2, Mar. 2016, pp. 56-66.
- [4] Wan, Choi, and Moon, Jeong, “Performance Improvement of the FLC by Membership Function Modification Algorithm” *The Korea Information Processing Society* vol. 8, no. 2, Apr. 2001, pp. 123-129
- [5] Ho, Kim, “Fuzzy Control Theory and It’s Applications” *Journal of the Korean professional engineers association* vol. 24 no. 5, 1991, pp. 26-37

- [6] Jae. Cho, "Color Detection and Psychology Analysis Using Fuzzy Reasoning Method" *J. of the Korea Institute of Electronic Communication*, vol. 6, no. 1, 2011, pp. 84-89.
- [7] Sung. Bae, and Chang. Lee, "Multi-Channel AD Converters with High-Resolution and Low-Speed" *J. of the Korea Institute of Electronic Communication*, vol. 3, no. 3, Sep. 2008, pp. 165-169.
- [8] Hee. Kwon, and Jung. Yoo, "Fuzzy Inference System Architecture for Customer Satisfaction Service" *Journal of the Korea Society of Computer and Information* v.15, no.1, 2010, pp. 219-226
- [9] Seong. Cho, "A Fuzzy-based Fusion Wireless Localization Method" *J. of the Korea Institute of Electronic Communication*, vol. 10, no. 4, Apr. 2015, pp. 507-510.
- [10] Kwang. Kim, and Young. Woo, "An Enhanced Max-Min Neural Network using a Fuzzy Control Method" *J. of the Korea Institute of Electronic Communication*, vol. 8, no. 8, 2013, pp. 1196-1199.
- [11] Young. Lee, and Hai. Jung, "A Study on the Step-Up Converter with the New Topology Method" *J. of the Korea Institute of Electronic Communication*, vol. 15, no. 6, Dec. 2020, pp. 1175-1186.
- [12] Jin. Oh, "Design of a Smart Attitude Control Algorithm based on the Fuzzy Logic" *The Journal of the Convergence on Culture Technology*, vol. 5, no. 3, Aug. 2019, pp. 257-262
- [13] Jun. Yoo, "Control Method Based on fuzzy Logic" *Electronics and Telecommunications Trends* vol. 11, no. 2, Jun. 1996, pp. 45-59.

## 저자 소개

### 한영복(Young-Bok Han)



1993년 원광대학교 전기공학과 졸업(학사)

1997년 전북대학교 산업기술학 졸업(석사)

현재 군산대학교 전자정보공학부 박사과정

1993년~2002년 한국전력공사 근무

2002년~2020년 한국중부발전 근무

※ 관심분야 : 인공지능경망, 퍼지제어, 공장자동화, PID 제어, PLC설계

### 김성호(Sung-Ho Kim)



1984년 고려대학교 공과대학 학사

1986년 고려대학교 공과대학 석사

1991년 고려대학교 공과대학 박사

1988년~1990년 고려대 생산기술 연구소 연구원

1995년~1996년 Japan Hiroshima University Post Doc.

1991년~현재 군산대학교 전자정보공학부 교수

※ 관심분야 : 인공지능경망, 퍼지 센서네트워크, 공장자동화 및 오류검출

### 김변곤(Byun-Gon Kim)



1990년 한국항공대학교 공과대학 학사

1997년 전북대학교 공과대학 석사

2001년 전북대학교 공과대학 박사

2001년~2002년 표준과학연구원 Post Doc.

2005년~현재 군산대학교 전자공학과 교수

※ 관심분야 : 인공지능경망, 무선 센서네트워크, 퍼지 제어