

적외선 열화상 카메라를 이용한 퍼지추론 기반 열화진단 시스템 개발

Development of Fuzzy Inference-based Deterioration Diagnosis System Using Infrared Thermal Imaging Camera

최우용* · 김종범* · 오성권† · 김영일**
(Woo-Yong Choi · Jong-Bum Kim · Sung-Kwun Oh · Young-Il Kim)

Abstract – In this paper, we introduce fuzzy inference-based real-time deterioration diagnosis system with the aid of infrared thermal imaging camera. In the proposed system, the infrared thermal imaging camera monitors diagnostic field in real time and then checks state of deterioration at the same time. Temperature and variation of temperature obtained from the infrared thermal imaging camera variation are used as input variables. In addition to perform more efficient diagnosis, fuzzy inference algorithm is applied to the proposed system, and fuzzy rule is defined by If-then form and is expressed as lookup-table. While triangular membership function is used to estimate fuzzy set of input variables, that of output variable has singleton membership function. At last, state of deterioration in the present is determined based on output obtained through defuzzification. Experimental data acquired from deterioration generator and electric machinery are used in order to evaluate performance of the proposed system. And simulator is realized in order to confirm real-time state of diagnostic field

Key Words : Infrared thermal imaging camera, Fuzzy inference algorithm, Deterioration diagnosis, Variation

1. 서 론

수배전반은 집단거주지역, 빌딩, 학교, 공장, 항만, 공항, 상하수 처리장, 변전소, 중공업 플랜트, 지하철, 화학단지, 제철소 등의 광범위한 전력 수용가에서 특고압의 전력을 저압으로 변환하여 해당 설비에 공급하는 수배전 계통에 설치되어 전력 감시, 제어 및 보호를 위하여 사용된다.

이 수배전반에서는 내부의 부품고장 및 전기의 사용량이 급격히 증가함에 따라 접속부분에서 절연 열화가 일어나 갑작스런 화재 및 정전사고도 증가하고 있다. 이러한 사고의 예방을 위한 노력에도 불구하고 사고 발생건수가 지속적으로 증가하고 있으며, 이로 인한 경제적 손실뿐만 아니라 사회에 영향을 미치고 있다. 현재 전기기기의 장시간에 걸친 원활한 운용과 신뢰성 확보가 매우 중요한 이슈가 되고 있고, 사고발생 전에 접속부의 열화정도를 진단하여 사전에 유지보수를 수행하기 위한 노력이 계속되어지고 있다.

본 논문에서는 유지보수를 위하여 기존의 광범위한 전력설비 진단 분야에 널리 활용되고 있는 적외선 카메라를 이용하였다. 적외선 기술은 피사체의 실물을 보는 것이 아닌 적외선 파장형태의 열을 검출, 피사체 표면 복사열의 강도를 측정하여 강도에 따른 각각의 다른 색상으로 표현해주는 것이다. 그러나 이를 수배전반에 활용하여 전류의 양향에 따라 발생하는 열을 감시하여 설비의 상태를 판별할 수 있다. 그러나 기존 열화상 카메라는 대부분 휴대성이 간편한 대신 수배전반을 개별적으로 개폐하여 점검하는 방법을 사용하여 실시간으로 수배전반 내부의 이상을 감지 못하는 단점이 있다. 그래서 32×31 해상도를 갖지만 가까운 거리에서 물체의 구별이 가능하고 저가형으로 제작할 수 있으며 수배전반 내부에 부착을 하여 실시간으로 감시가 가능한 2D 서모그래피 어레이 센서를 이용하였다. 그리고 열화진단 방법으로 기존에 열화도를 기준으로 열화진단을 하는 방법과는 달리 퍼지추론 알고리즘을 이용하여 배전반, 분전반, 모터제어반의 온도 및 열화상태를 감시할 수 있는 효율적인 실시간 열화진단 시스템을 개발한다.

본 논문은 다음과 같은 구성으로 이루어져 있다. 먼저 2장에서는 퍼지추론 기반 열화진단 시스템에 입력될 데이터의 온도 데이터 취득 및 생성과정을 설명하고, 3장에서 열화진단 시스템에 이용된 퍼지추론 알고리즘에 대하여 설명한다. 그리고 4장에서는 취득된 데이터들을 이용하여 기존 열화진단 시스템과의 성능을 비교한 후 마지막으로 5장에서 퍼지추론 기반 열화진단 시스템에 대한 결론을 서술한다.

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, The University of Suwon, Korea.

E-mail : ohsk@suwon.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, The University of Suwon, Korea.

** Dept. of Electrical Engineering, Daelim University College, Korea.

Received : November 05, 2014; Accepted : May 04, 2015

2. 열화상카메라에 의해 취득된 온도데이터를 이용한 입력데이터 생성

본 연구에서 이용된 열화상 카메라[7][8][9][10]는 기존 높은 해상도를 갖고 휴대가 용이한 열화상 카메라에 비해 낮은 해상도(32×31)를 갖지만, 저가형으로써 수배전반 내부에 장착이 가능하여 실시간으로 열화를 진단 및 감시하는데 적합하다. 열화상카메라를 통해 획득되는 데이터는 각 픽셀마다의 온도를 나타내고 있다. 이 온도데이터만을 가지고는 열화진단 시스템의 입력데이터로 사용할 수 없기 때문에 퍼지추론 기반 열화진단 시스템에 알맞게 온도데이터를 재구성 해주어야 한다.

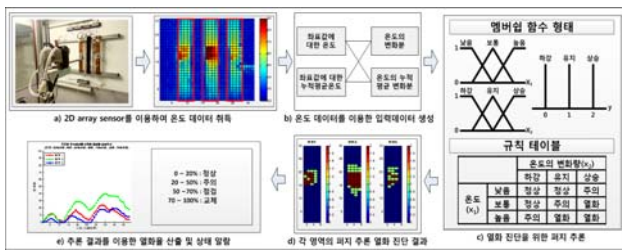


그림 1 퍼지추론 기반 열화진단 시스템
Fig. 1 Fuzzy inference-based deterioration diagnosis system

2.1 온도 데이터를 이용한 입력변수의 재구성

열화상 카메라를 통해 취득된 온도 데이터를 이용하여 퍼지추론에 이용될 입력변수로 재구성해야 한다. 우선, 입력변수는 좌표값에 대한 온도를 이용한 입력변수와 해당영역의 평균온도를 이용하는 방법, 그리고 각각을 누적한 방법으로 생각하였다. 입력변수를 누적한 이유는 열화상 카메라로 데이터를 취득 시 일정한 온도가 취득되는 것이 아니라 미세하게 온도가 계속 흔들리는 것을 확인 할 수 있었기 때문에 누적을 하여 미세하게 흔들리는 점을 보완하기 위해 적용하였다. 좌표 값에 대한 온도나 누적온도를 이용한 경우와 해당영역에 대한 평균온도나 누적평균온도를 사용하여 데이터가 처리 되는 과정은 다음 그림 2와 같다.



그림 2 데이터 변환 방식에 따른 시스템 흐름도
Fig. 2 Flowchart of system by data transform

본 연구에서는 해당영역에 대한 평균온도를 이용한 실험 결과는 해당영역 전체를 평균을 시킴으로써 전체에 의해 각 좌표값들의 온도 값들이 무시되는 것을 확인하였다. 그래서 좌표 값에 대한 온도를 입력변수로 사용하여 진행하였다.

2.2 재구성된 온도데이터를 이용한 변화분 및 입력데이터 생성

해당영역의 좌표값들을 이용하여 열화진단 시스템의 입력데이터로 사용되기 위해서 입력변수의 생성이 필요하다. 열화상카메라를 통해 취득된 좌표값에 대한 온도를 이용하거나 일정시간동안 취득된 온도데이터를 누적하여 평균을 낸 평균누적온도를 이용하는 것을 제안하였고, 온도와 평균누적온도를 이용하여 시간의 변화를 고려한 온도의 변화분과 평균누적온도의 변화분을 생성하였다. 이 변수들을 이용하여 다음 그림 3과 같은 4가지 유형의 입력데이터를 생성하였다.

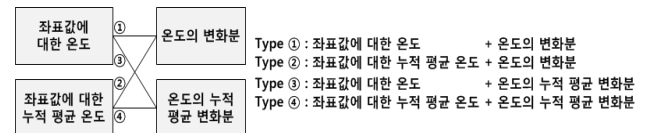


그림 3 입력데이터 구성방법
Fig. 3 Composition method of input data

입력변수 x_1 는 좌표값에 대한 온도나 평균누적온도를 이용한다. 좌표값에 대한 온도는 열화상카메라를 통해 취득된 현재시간의 온도으로써 식 1과 같다.

$$x_1 = x(t) \tag{1}$$

여기서, $x(t)$ 는 현재시간에 대한 좌표값의 온도를 의미한다. 평균누적온도는 설정시간동안 누적된 온도데이터를 평균을 낸 온도으로써 식 2와 같다.

$$x_1 = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} x(t-i)}{n} \tag{2}$$

여기서, n 은 설정시간을 의미하고, $x(t-i)$ 는 i 만큼의 과거 온도데이터를 의미한다. 입력변수 x_2 는 시간의 변화를 고려한 온도의 변화분이나 평균누적온도의 변화분을 이용한다. 온도의 변화분은 현재온도와 설정된 시간이전 온도의 차로써 식 3과 같다.

$$x_2 = x(t) - x(t-(n-1)) \tag{3}$$

여기서, $x(t)$ 는 현재시간에 대한 좌표값의 온도를 의미하고, $x(t-(n-1))$ 는 현재시간에 대한 설정시간이전의 온도를 의미한다. 평균누적온도의 변화분은 현재 누적된 평균누적온도와 설정시간이전의 누적된 평균누적온도의 차로써 식 4와 같다.

$$x_2 = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} x(t-i)}{n} - \frac{\sum_{i=n}^{2n-1} x(t-i)}{n} \tag{4}$$

여기서, n 은 설정시간을 의미하고, $x(t-i)$ 는 i 만큼의 과거 온도데이터를 의미한다. 위와 같은 방법으로 취득된 온도데이터를 퍼지추론 기반 열화진단 시스템에 이용될 2입력 데이터로 재구성하였다. 그리고 시간의 변화를 감안하여 열화상태를 더 정확하게 예측할 수 있다.

3. 퍼지 추론을 이용한 열화진단 시스템의 설계

퍼지추론 기반 열화진단 시스템을 설계하기에 앞서 기존 열화진단 시스템에 대한 연구가 필요하다. 기존 열화진단 시스템은 온도를 기준하여 단순히 열화인지 아닌지를 구분하는 단순한 예측 시스템이다. 본 장에서는 기존 열화진단 시스템에 대한 분석과 퍼지추론 기반 열화진단 시스템의 구성을 설명한다.

3.1 온도기준을 이용한 기존 열화진단 시스템

기존의 열화진단은 온도 기준에 의한 방법을 이용하였다. 이 방법은 장비의 기능에 의존도가 높고, 분석되는 결과는 직관적 감각을 이용한 단순한 예측을 할 뿐이다. 또한 결과를 다양한 각도에서 분석하기 위해서는 수집된 결과를 다시 분석해야하기 때문에 신속성이 떨어지고 상관관계 분석에 필요한 기준화상과의 매칭도 어렵다. 이는 대부분의 장비들이 일시적인 측정값을 활용하기 위해 제작되어 경향분석을 위한 기능이 없기 때문이다.

기존 열화진단 시스템에서는 열화정보를 위한 열화율 산출방법과 건전성 지수 산출방법이 있다. 열화율은 사용자가 선택한 영역에서 기준온도 이상이 되는 면적을 구하여 열화정도를 판단하는 방법이다. 다음은 열화율 산출방법이다.

[Step 1] 각 영역에 대한 행렬 형태로 온도에 의해 진단된 데이터의 행렬을 생성한다. n 번째 영역에 대한 결과값을 행렬로 다음처럼 생성한다.

$$a_n = \begin{bmatrix} y_{11} & \dots & y_{1l} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{lm} & \dots & y_{lm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

[Step 2] 위와 같이 설정된 영역의 면적 A_n 을 구한다.
(정상 : 0, 열화 : 1)

$$A_n = m \times l \quad (6)$$

[Step 3] 설정된 영역에서 모든 좌표값의 결과를 다음 식을 통하여 열화면적인 TA_n 을 구한다.
(정상 : 0, 열화 : 1)

$$TA_n = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m y_{ij} \quad (7)$$

[Step 4] 설정된 각 영역에 대하여 열화율을 계산한다.

$$TR_n = \frac{TA_n}{A_n} \times 100 \quad (8)$$

[Step 5] 열화율에 따른 경보를 올린다.

- 0 ~ 20% : 정상상태 (정상)
- 20 ~ 50% : 주의가 필요한 상태 (주의)
- 50 ~ 70% : 설비 점검이 필요한 상태 (점검)
- 70 ~ 100% : 설비 교체 또는 유지보수가 필요한 상태 (교체 및 보수)

건전성 지수(Healthy Performance Index : HPI)는 예를 들어 3개의 영역을 설정하고, 영역간의 상관관계를 통하여 영역의 열화상태를 판단하는 방법이다. 다음은 건전성 지수 산출방법이다.

[Step 1] 하나의 센서에 대하여 최대 3개의 영역까지 설정할 수 있으며, 3개 설정했을 경우 각 영역에 대하여 최대 (x_1, x_2, x_3) 를 각각 계측한다.

[Step 2] 각 영역에 대하여 멤버쉽 함수를 아래와 같이 정의하였으며 30, 60도는 설정 가능한 데이터이다. 영역의 온도입력에 대한 멤버쉽 값은 $u(x_1), u(x_2), u(x_3)$ 정의한다.

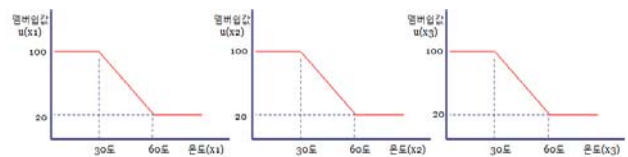


그림 4 각 영역의 멤버쉽 함수
Fig. 4 Membership function of each area

[Step 3] 건전성 지수는 다음 식 (9)와 같이 계산되고, 건전성 지수가 설정 값보다 높은 경우 경보한다.

$$HPI = \min(u(x_1), u(x_2), u(x_3)) \quad (9)$$

3.2 퍼지추론 기반 열화진단 시스템

퍼지 추론[1][2]은 modus ponens를 추론구조로 사용하고, 전제와 조건이 애매성을 가지고 있더라도 일치하는 정도에 따라 근사하게 결론을 도출할 수 있다. 퍼지 추론을 하기 위해서는 추론규칙이 필요하다. 그리고 퍼지 추론의 추론규칙은 If-then 으로 기술한다. If절은 전반부, 전제부 등으로 불리고, Then절은 후반부, 결론부등으로 불린다.

퍼지 추론의 순서는 If-then형식으로 규칙을 세우고, Lookup table을 형성한다. 이 규칙에서 입출력 변수의 멤버쉽 함수를 구하고 삼각형형태를 형성한다. 각각의 규칙에 있어 전반부의 추론 결과 값을 비퍼지화 과정을 거쳐 후반부 추론결과 값이 된다

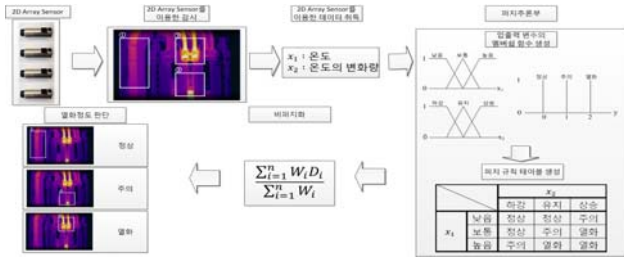


그림 5 퍼지추론 기반 열화진단 시스템의 흐름도
 Fig. 5 Flow chart of fuzzy inference-based deterioration diagnosis system

퍼지추론을 위한 입출력변수의 멤버십 함수는 2입력인 경우와 3입력인 경우가 있다. 2입력과 3입력에서 퍼지추론의 입출력변수 멤버십 함수는 설정된 값에 의한 표준화된 삼각형형태를 사용한다. 입출력 멤버십 함수는 모두 3개의 퍼지변수의 수를 사용하였다. 2입력 퍼지추론 전반부와 후반부의 멤버십 함수는 다음 그림 6과 같다.

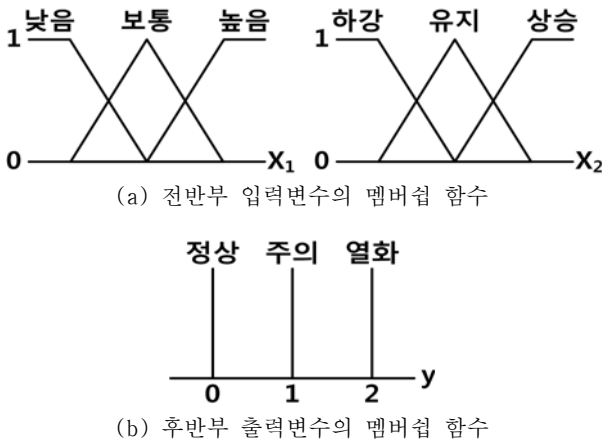


그림 6 2입력 퍼지추론의 멤버십 함수
 Fig. 6 Membership function of 2-input fuzzy inference

2입력 퍼지추론[3][4] 전반부와 후반부의 언어적 제어변수는 입력변수 x_1 , 입력변수 x_2 , 그리고 출력변수 y 에 대해 정상, 주의, 열화의 3개로 구성되어 있으며, 생성된 퍼지 규칙 테이블은 다음 표 1과 같다.

표 1 2입력 퍼지 규칙 테이블
 Table 1 2-input fuzzy rule table

		x_2		
		하강	유지	상승
x_1	낮음	정상	정상	주의
	보통	정상	주의	열화
	높음	주의	열화	열화

표 1에 의해 생성된 If-then 규칙은 다음 식 9과 같다.

$$R^k : IF x_1 \text{ is } A_i \text{ and } x_2 \text{ is } B_i \text{ THEN } y \text{ is } D_i \quad (9)$$

여기서, R^k 는 k 번째의 퍼지규칙 ($k=1, 2, \dots, 9$), x_1 과 x_2 는 입력변수, A_i 와 B_i 는 퍼지 멤버십 함수, D_i 는 출력의 멤버십 함수를 의미한다. 3입력 퍼지추론 전반부와 후반부의 멤버십 함수는 다음 그림 7과 같다.

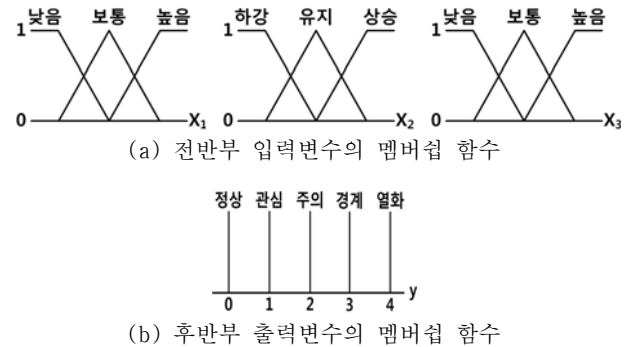


그림 7 3입력 퍼지추론의 멤버십 함수
 Fig. 7 Membership function of 3-input fuzzy inference

3입력 퍼지추론 전반부와 후반부의 언어적 제어변수는 입력변수 x_1 , 입력변수 x_2 , 입력변수 x_3 그리고 출력변수 y 에 대해 정상, 관심, 주의, 경계, 열화의 5개로 구성되어 있으며, 생성된 퍼지 규칙 테이블은 다음 표 2와 같다.

표 2 3입력 퍼지 규칙 테이블
 Table 2 3-input fuzzy rule table
 (a) $x_3 = \text{낮음}$

		x_2		
		하강	유지	상승
x_1	낮음	정상	정상	관심
	보통	정상	관심	주의
	높음	관심	주의	주의

(b) $x_3 = \text{보통}$

		x_2		
		하강	유지	상승
x_1	낮음	관심	관심	주의
	보통	관심	주의	경계
	높음	주의	경계	경계

(c) $x_3 = \text{높음}$

		x_2		
		하강	유지	상승
x_1	낮음	주의	주의	경계
	보통	주의	경계	열화
	높음	경계	열화	열화

표 2에 의해 생성된 If-then 규칙은 다음 식 10와 같다.

$$R^k: IF x_1 is A_i and x_2 is B_i and x_3 is C_i THEN y is D_i \quad (10)$$

여기서, R^k 는 k 번째의 퍼지규칙 ($k=1, 2, \dots, 27$), x_1, x_2, x_3 는 입력변수, A_i, B_i, C_i 는 퍼지 멤버십 함수, D_i 는 출력의 멤버십 함수를 의미한다. 본 논문에서는 2입력인 퍼지추론을 이용하였고, 표 1의 입출력 변수의 멤버십 함수는 그림 6과 같이 표준화된 삼각형 형태를 사용하였다. 각각의 규칙에 있어 전반부의 추론 결과 값은 다음과 식 11과 같다.

$$W_i = Procut\{\mu_{A_i}(x_1), \mu_{B_i}(x_2)\} \quad (11)$$

여기서, W_i 는 각 입력 변수에 대한 퍼지 추론결과 값으로 각 퍼지 규칙의 적합도 값이라 한다. 각각의 퍼지 규칙에 대한 전반부 추론결과 값은 전반부의 입력인 x_1, x_2 의 사상된 멤버십 함수값 $\mu_{A_i}(x_1), \mu_{B_i}(x_2)$ 의 곱연산으로 계산한다. 그리고 비퍼지화(defuzzification)과정을 거친 후반부 추론결과 값은 식 12를 통해 얻을 수 있다.

$$\Delta U^* = \frac{\sum_{i=1}^N W_i \cdot D_i}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (12)$$

여기서, W_i 는 각 퍼지 규칙에서의 퍼지 추론결과 값이고 D_i 는 퍼지 규칙 테이블에 의한 후반부 출력의 멤버십 함수값이다. 방법 중 무게 중심법(Center of gravity)을 적용하여 추론 결과를 얻었다. 그리고 추론결과 값은 후반부 출력 변수인 정상(0), 주의(1), 열화(2) 중 가까운 값을 선택한다.

4. 실험 및 결과고찰

퍼지추론 알고리즘을 이용하여 설계된 열화진단 시스템 [11][12][13][14]은 우선 적외선 열화상 카메라를 이용하여 온도 데이터를 취득한 후 열화진단 시스템에 알맞게 온도데이터를 재구성하여 입력데이터로 사용하였고, 퍼지추론 알고리즘을 통해 진단하고자 하는 부위의 열화상태를 판별하였다. 여기서 열화상 카메라를 통해 얻어진 온도데이터는 열화발생장치 이용하거나 실제로 사용이 빈번한 전기기기들을 통하여 취득하였다. 그리고 취득된 데이터를 통해 시간에 따른 온도의 변화 나타내는 변화분을 생성한 후 퍼지추론 알고리즘의 입력데이터로 사용하여 정상, 주의, 열화로 분류하는 수배전반의 실시간 열화진단 시스템을 설계한다.

4.1 열화판단기준을 이용한 패턴 분류율 산출

패턴 분류율은 열화진단 시스템의 성능을 정량적으로 보여주기 위하여 열화판단기준을 설정하였다. 이 기준을 이용하여 본

연구에서 제안한 열화진단 시스템이 기존열화진단 시스템보다 나은지를 확인할 수 있다. 열화판단기준은 다음 표 3과 같다.

표 3 열화판단기준

Table 3 Standard of deterioration judgement

온도	상태
55도 미만	정상
55도 이상~60도 미만	주의
60도 이상	열화

표 3에서 열화온도는 60도로 임의로 설정한 것이고, 55도 이상~60도 미만인 구간을 열화가 진행될 가능성이 있는 주의온도로 설정하였으며 55도 미만은 정상온도로 설정하였다. 주의온도 구간은 온도뿐만 아니라 온도의 변화를 고려하여 열화의 진행 가능성이 있는지 없는지를 예측하는 부분이다.

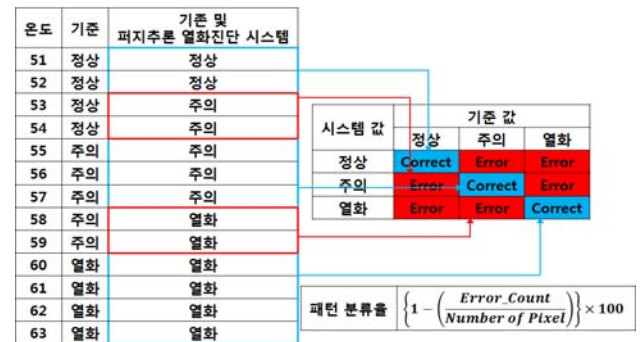


그림 8 열화판단기준에 의한 패턴 분류율 산출

Fig. 8 Calculation of pattern classification rate by standard of deterioration judgement

그림 8은 열화판단기준에 의한 패턴 분류율을 산출하는 법을 나타낸다. 열화판단기준에 의해 정해진 기준과 기준 및 퍼지추론 열화진단 시스템으로 출력되는 출력 값을 각각 비교하여 패턴 분류율을 구하고, 어떤 시스템이 나은지를 정량적인 성능으로 보여 주기 위해 사용된다.

4.2 성능 검증을 위한 입력데이터 생성

본 연구에서 퍼지추론 기반 열화진단 시스템[15][16][17][18] 성능을 검증하기 위해 여러 상황에서의 입력데이터를 필요로 한다. 우선 열화를 발생하는 장치를 통하여 다음 표 4와 같이 데이터를 취득하였고, 그림 9는 취득과정을 보여준다.

그림 9의 a)를 보면 열화발생장치를 이용해서 데이터를 취득하는 경우를 보여준다. 우선, 온도 설정부는 사용자가 원하는 온도를 설정을 하여 온도를 올리거나 줄일 수 있는 부분으로 열화 온도를 임의로 설정하고 취득할 수 있게 도와준다. 진단부위 설정부는 적외선 열화상 카메라를 설치하고 물체의 구별이 가능한 위치로 이동하여 데이터 취득을 가능하게 해주는 부분이다. 그림

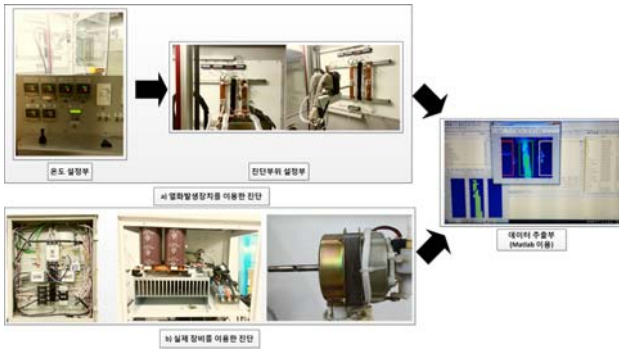


그림 9 열화상카메라를 이용한 온도데이터 취득
 Fig. 9 Acquisition of temperature data using infrared thermal imaging camera

9의 b)를 보면 분전반, 인버터, 전동기 등과 같은 실제로 열화가 발생할 수 있는 장비를 통해 데이터 취득하였다. 마지막으로 데이터 추출부는 프로그램을 이용하여 데이터를 추출하는 부분으로 열화상카메라를 통해 온도데이터를 취득하였다.

표 4 열화상카메라를 이용한 온도데이터 취득 방법
 Table 4 Acquisition method of temperature data using infrared thermal imaging camera

	획득 시간	데이터 획득 방법
Case 1	600초	초기 온도 : 30도 설정 온도 : 90도
Case 2	600초	초기 온도 : 30도 설정 온도 : ① 50도 유지 ② 70도 유지
Case 3	180초	분전반
Case 4	180초	인버터
Case 5	180초	컨버터
Case 6	180초	전동기

표 4에서 Case 1과 Case 2의 경우 열화발생장치를 통해 600 초 동안 취득된 데이터이다. Case 1의 경우 초기 30도 온도에서 90도까지 온도가 상승하는 경우로 설정하였고, Case 2의 경우 초기 30도 온도에서 50도 까지 온도를 상승시킨 후 일정시간 유지시킨 후 다시 70도까지 온도를 상승시켜 유지시킨다. 그리고 Case 2는 시간에 따른 온도의 변화를 확인하기 위한 데이터이다. 열화상카메라를 통해 실제 장비의 상태를 확인하기 위해 추가로 Case 3~Case 6과 같이 데이터 취득을 하였다. 개폐기, 계전기, 각종 보호장치, 계측기 및 모선등 같은 주요 장비가 설치되어있는 분전반, 교류와 직류간의 변환을 위한 인버터와 컨버터, 그리고 발전기와는 반대로 전기에너지를 역학적 에너지로 변환할 수 있는 전동기를 감시하여 데이터를 취득하였다.

4.3 생성된 입력데이터를 이용한 퍼지추론 기반 열화진단

적외선 열화상 카메라를 이용한 퍼지추론 기반 열화진단 시스템 개발

퍼지추론 기반 열화진단 시스템[5][6]의 성능은 6가지 유형으로 취득된 데이터를 이용하여 검증된다. 본 실험을 위해 사용된 시스템의 멤버쉽 함수 값은 입력되는 데이터 마다 다르게 설정하였는데 그 이유는 열화상카메라를 통해 감시하는 기기마다의 열화온도 및 온도의 변화정도가 다르기 때문이다. 그리고 설정된 멤버쉽 함수 값은 열화온도를 설정한 후 여러 실험을 통해 경험적으로 설정하였고 입력데이터의 유형은 기존 열화진단 시스템과의 비교를 위하여 Type 1으로 설정하였다. 멤버쉽 함수의 x_1 은 Type 1의 좌표값에 대한 온도를 나타내고, x_2 는 Type 1의 온도의 변화분을 나타낸다. 설정 시간은 열화를 진단하는 간격을 나타낸다. 표 5는 각 Case의 전체적인 파라미터 설정값을 보여준다.

표 5 파라미터 설정
 Table 5 Setting parameter

	Parameter	Value
Case 1 & Case 2	Type of input data	Type 1
	Membership function	$x_1:[53 \ 61], x_2:[-10 \ 10]$
	set time	20
Case 3	Type of input data	Type 1
	Membership function	$x_1:[53 \ 61], x_2:[-5 \ 5]$
	set time	20
Case 4 & Case 5	Type of input data	Type 1
	Membership function	$x_1:[53 \ 61], x_2:[-3 \ 3]$
	set time	20
Case 6	Type of input data	Type 1
	Membership function	$x_1:[43 \ 51], x_2:[-5 \ 5]$
	set time	20

아래 그림 10은 시스템의 설정 및 실행을 할 수 있는 실시간 열화진단 시뮬레이터를 보여준다.

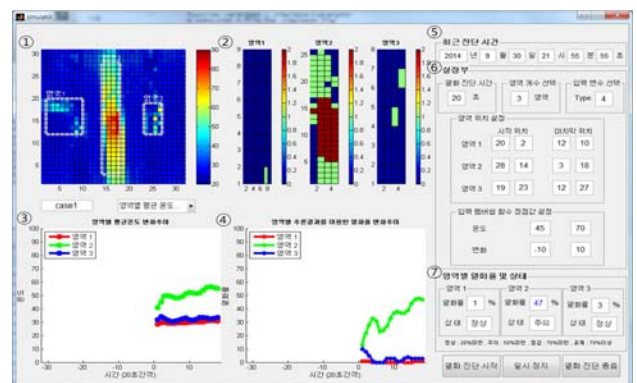


그림 10 퍼지추론 기반 열화진단 시뮬레이터

Fig. 10 Simulator of fuzzy-inference-based deterioration diagnosis

이 시뮬레이터는 사용자의 초기 파라미터 설정 및 진단상태를 확인 할 수 있도록 만든 것으로써, 그림 10에서 ①은 열화상 카메라를 이용하여 진단부의 설정된 영역의 상태를 확인할 수 있는 부분이다. ②는 ①에서 설정된 영역에 대하여 퍼지추론을 통해 각 좌표 값마다의 정상, 주의, 열화상태를 예측하는 부분이다. 그리고 ③과 ④는 각 영역별 평균온도와 퍼지추론 결과를 이용하여 얻어진 열화율의 변화를 확인 할 수 있는 부분이다. ⑤는 실시간으로 온도데이터를 취득하면 진단이 행해질 때 마다 시간을 표현해 주는 부분이고, ⑥은 설정부로서 진단하고자 하는 영역 설정 및 퍼지추론 전만부 멤버십 함수에 설정할 정점값 설정을 하는 부분이 된다. 마지막으로 ⑦은 퍼지추론을 통해 구해진 각 영역의 추론결과 값을 이용하여 열화율을 구하고, 열화율을 통해 영역별 상태를 표시해주는 부분이 된다.

4.3.1 Case 1을 이용한 테스트

열화발생장치에서 30도에서 90도까지 상승을 시키며 60초간 취득된 데이터를 이용하여 열화진단 시스템의 성능을 테스트를 하였다. 그림 11의 a)는 진단부에서 주의 깊게 보기위한 각 영역은 사용자에게 의해 설정하는 부분이고, b)는 설정된 영역의 온도 데이터를 영역별로 보여주는 것이 되겠다. c)는 기존에 온도만을 이용하여 열화진단을 하던 방식이고, d)는 퍼지추론을 이용하여 열화가능성을 예측한 방식이다. c)와 같은 경우 설정된 온도 60도가 넘을 경우에 열화임을 표현하는 것이고, d)와 같은 경우 60도가 넘을 경우 열화이며 55도 ~ 60도 사이의 온도 값 중 변화분이 일정수준 상승하고 있다면 열화의 가능성이 있다고 예측하고 있는 것을 표현하고 있다.

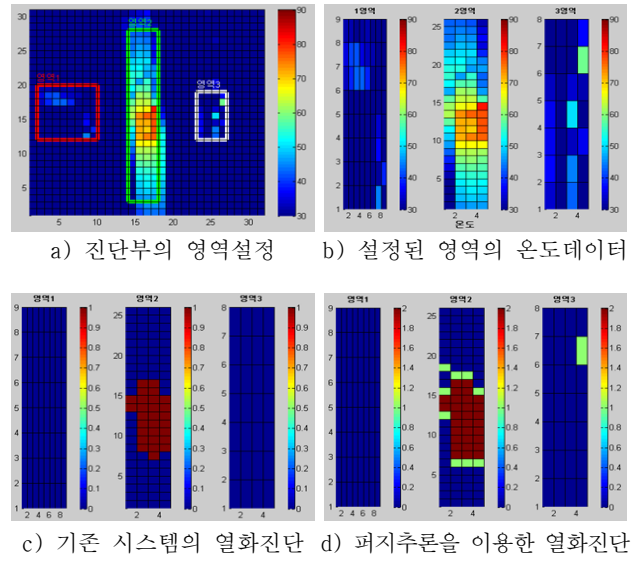


그림 11 Case 1의 열화진단 결과

Fig. 11 Result of deterioration diagnosis in case 1

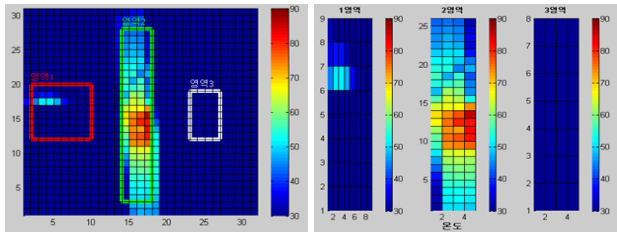
표 6 Case 1의 영역별 패턴 분류율

Table 6 Patten classification rate of given area in case 1

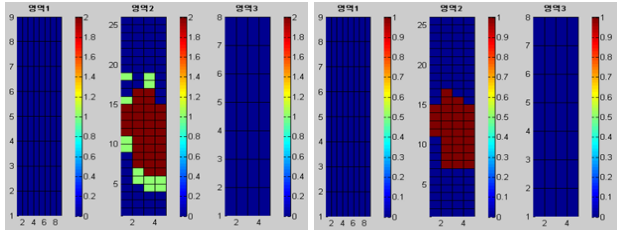
	영역 1	영역 2	영역 3
기존 열화진단 시스템의 패턴 분류율	100 ±0	87.46 ±5.7	97.72 ±1.87
퍼지추론 기반 열화진단 시스템의 패턴 분류율	100 ±0	97.46 ±1.47	99.42 ±1.26

4.3.2 Case 2을 이용한 테스트

Case 2는 열화발생장치에서 온도 설정을 30도~50도까지 온도를 상승시키고 일정시간 유지 시킨 후 70도 까지 상승시켜 유지시킨 데이터이다. 이번 실험의 경우 온도를 상승 후 유지를 하며 온도의 변화를 시스템이 얼마나 정확히 감지하여 예측하는지를 확인하는 실험이다. 그림 12의 a)는 진단부에서 주의 깊게 보기위한 각 영역은 사용자에게 의해 설정하는 부분이고, b)는 설정된 영역의 온도데이터를 영역별로 보여주는 것이 되겠다. c)는 기존에 온도만을 이용하여 열화진단을 하던 방식이고, d)는 퍼지추론을 이용하여 열화가능성을 예측한 방식이다.



a) 진단부의 영역설정 b) 설정된 영역의 온도데이터



c) 기존 시스템의 열화진단 d) 퍼지추론을 이용한 열화진단

그림 12 Case 2의 열화진단 결과

Fig. 12 Result of deterioration diagnosis in case 2

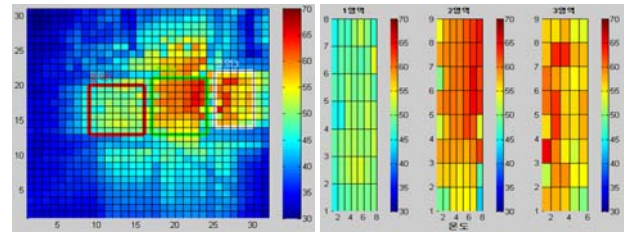
표 7 Case 2의 영역별 패턴 분류율

Table 7 Patten classification rate of given area in case 2

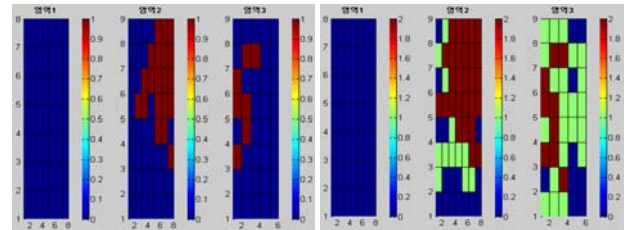
	영역 1	영역 2	영역 3
기존 열화진단 시스템의 패턴 분류율	100	91.1	100
	±0	±6.29	±0
퍼지추론 기반 열화진단 시스템의 패턴 분류율	100	98.21	100
	±0	±1.5	±0

4.3.3 Case 3을 이용한 테스트

전기 시설물을 안전하게 사용할 수 있도록 해주는 분전반은 전기 시설물에 이상이 생길 경우 차단기를 동작하여 사고를 예방한다. 이 분전반에는 각종 안전장치가 존재하지만 이 장치들 또한 열화의 가능성을 갖고 있기 때문에 감시 및 진단을 하였다. 그림 13의 a)는 진단부에서 주의 깊게 보기위한 각 영역은 사용자에 의해 설정하는 부분이고, b)는 설정된 영역의 온도데이터를 영역별로 보여주는 것이 되겠다. c)는 기존에 온도만을 이용하여 열화진단을 하던 방식이고, d)는 퍼지추론을 이용하여 열화가능성을 예측한 방식이다. 그림 13은 분전반을 감시 및 진단을 하며 시스템이 얼마나 정확히 온도를 감지하여 예측하는지를 확인하는 실험이다.



a) 진단부의 영역설정 b) 설정된 영역의 온도데이터



c) 기존 시스템의 열화진단 d) 퍼지추론을 이용한 열화진단

그림 13 Case 3의 열화진단 결과

Fig. 13 Result of deterioration diagnosis in case 3

표 8 Case 3의 영역별 패턴 분류율

Table 8 Patten classification rate of given area in case 3

	영역 1	영역 2	영역 3
기존 열화진단 시스템의 패턴 분류율	99.65	88.73	92.80
	±1.04	±19.26	±14.83
퍼지추론 기반 열화진단 시스템의 패턴 분류율	100	96.30	99.18
	±0	±7.18	±1.63

4.3.4 Case 4을 이용한 테스트

교류를 직류로 변환시켜주는 컨버터는 여러 전기기기에 사용되고 있으며, 변환을 하는 과정에서 상당한 열이 발생하여 열화의 가능성이 있다. 그리고 24시간동안 동작해야 한다는 장치의 특성상 감시 및 진단이 필요하다. 그림 14의 a)는 진단부에서 주의 깊게 보기위한 각 영역은 사용자에 의해 설정하는 부분이고, b)는 설정된 영역의 온도데이터를 영역별로 보여주는 것이 되겠다. c)는 기존에 온도만을 이용하여 열화진단을 하던 방식이고, d)는 퍼지추론을 이용하여 열화가능성을 예측한 방식이다. 그림 14는 컨버터가 동작하고 온도의 변화를 감시 및 진단하여 시스템이 얼마나 정확히 온도를 감지하여 예측하는지를 확인하는 실험이다.

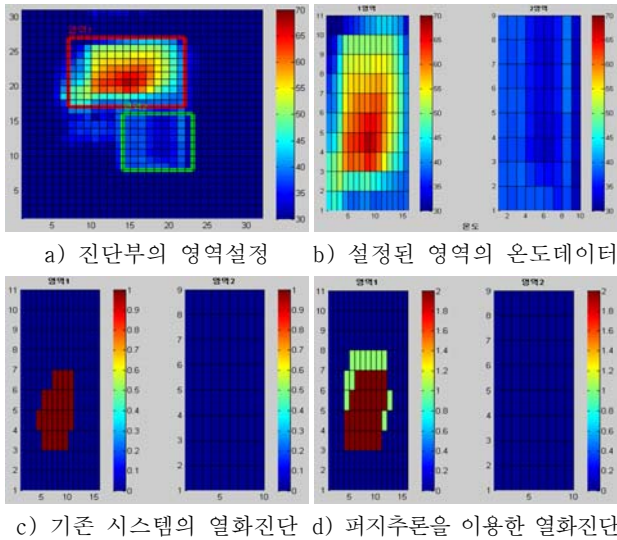


그림 14 Case 4의 열화진단 결과
 Fig. 14 Result of deterioration diagnosis in case 4

표 9 Case 4의 영역별 패턴 분류율
 Table 9 Patten classification rate of given area in case 4

	영역 1	영역 2
기존 열화진단 시스템의 패턴 분류율	89.39 ±0.64	100 ±0
퍼지추론 기반 열화진단 시스템의 패턴 분류율	97.41 ±1.58	100 ±0

4.3.5 Case 5을 이용한 테스트

직류를 교류로 변환시켜주는 인버터는 컨버터와 같이 여러 전 기기에 사용되고 있다. 이 인버터는 다양한 크기와 주파수를 갖는 교류전압을 만들 수 있어 교류전동에 사용이 용이하고, 정전 시 교류전압을 공급해주는 무정전전원장치에도 이용되고 있다. 그리고 24시간동안 동작해야 한다는 장치의 특성상 감시 및 진단이 필요하다. 그림 15의 a)는 진단부에서 주의 깊게 보기위한 각 영역은 사용자에게 의해 설정하는 부분이고, b)는 설정된 영역의 온도데이터를 영역별로 보여주는 것이 되겠다. c)는 기존에 온도만을 이용하여 열화진단을 하던 방식이고, d)는 퍼지추론을 이용하여 열화가능성을 예측한 방식이다. 그림 15는 인버터가 동작하고 온도의 변화를 감시 및 진단하여 시스템이 얼마나 정확히 온도를 감지하여 예측하는지를 확인하는 실험이다.

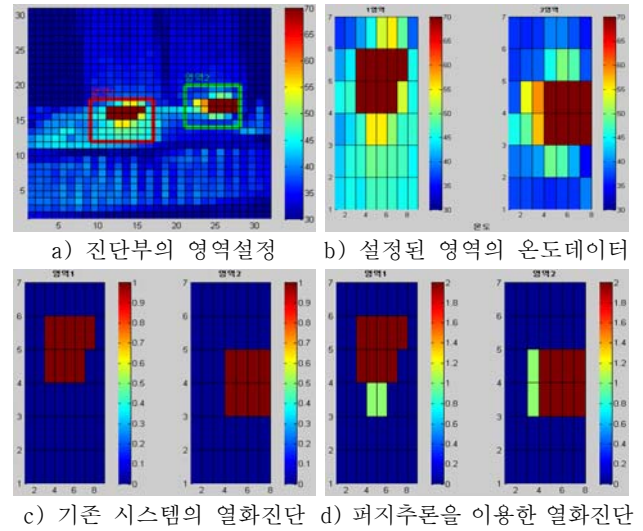


그림 15 Case 5의 열화진단 결과
 Fig. 15 Result of deterioration diagnosis in case 5

표 10 Case 5의 영역별 패턴 분류율
 Table 10 Patten classification rate of given area in case 5

	영역 1	영역 2
기존 열화진단 시스템의 패턴 분류율	97.00 ±0.53	97.22 ±0.94
퍼지추론 기반 열화진단 시스템의 패턴 분류율	99.47 ±1.12	99.6 ±0.79

4.3.6 Case 6을 이용한 테스트

전기에너지를 역학적 에너지로 바꿀 수 있는 전동기는 적용되는 분야가 다양하며 그 사용량이 크고 고속회전 시에는 상당한 열이 발생하기 때문에 열화의 가능성이 높아 감시 및 진단이 필요한 장치이다. 그림 16의 a)는 진단부에서 주의 깊게 보기위한 각 영역은 사용자에게 의해 설정하는 부분이고, b)는 설정된 영역의 온도데이터를 영역별로 보여주는 것이 되겠다. c)는 기존에 온도만을 이용하여 열화진단을 하던 방식이고, d)는 퍼지추론을 이용하여 열화가능성을 예측한 방식이다. 그림 16은 모터가 동작하며 상승되는 열에 대해 시스템이 얼마나 정확히 감지하여 예측하는지를 확인하는 실험이다.

표 11 Case 6의 영역별 패턴 분류율
 Table 11 Patten classification rate of given area in case 6

	영역 1	영역 2	영역 3
기존 열화진단 시스템의 패턴 분류율	100 ±0	76.25 ±9.94	100 ±0
퍼지추론 기반 열화진단 시스템의 패턴 분류율	100 ±0	94.03 ±4.71	100 ±0

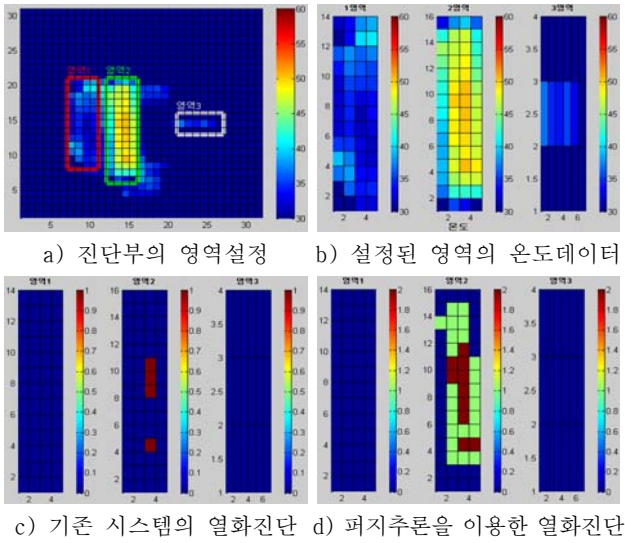


그림 16 Case 6의 열화진단 결과
 Fig. 16 Result of deterioration diagnosis in case 6

5. 결 론

본 논문에서 제안한 퍼지추론 기반 열화진단 시스템은 열화상 카메라를 이용하여 취득된 온도데이터를 이용한다. 기존에 열화 온도를 기준으로 한 열화진단 시스템은 단순히 열화인지 아닌지를 판단하는 단순한 예측밖에 하지 못하는 점과 장비에 대한 의존도가 높으며, 사용자의 직관적 감각을 이용한다는 단점이 존재하기에 퍼지추론 알고리즘을 적용하여 열화뿐만 아니라 열화의 가능성을 예측할 수 있는 시스템을 개발하였다. 그리고 열화의 가능성을 예측하기 위해 시간의 변화를 고려한 변화분을 이용하였다. 변화분은 과거의 온도데이터와 현재의 온도데이터 간 차이를 값으로 한다. 열화발생장치에서 취득된 온도데이터 뿐만 아니라 다양한 전기기기를 통해 취득된 온도데이터를 이용하여 시스템의 성능을 확인하였고, 시뮬레이터를 구성하여 진단부의 열화 상태를 실시간으로 확인이 용이하게 개발하였다.

감사의 글

본 연구는 경기도의 경기도지역협력연구센터사업의 일환으로 수행하였음[GRRC 수원2014-B2, U-city 보안감시 기술협력센터]

References

[1] Pedrycz, Witold. "An identification algorithm in fuzzy relational systems." *Fuzzy sets and systems* 13.2 (1984): 153-167.

[2] Pedrycz, Witold. "Numerical and applicational aspects of fuzzy relational equations." *Fuzzy Sets and Systems* 11.1 (1983): 1.

[3] Oh, Sungkwun, and Witold Pedrycz. "Identification of fuzzy systems by means of an auto-tuning algorithm and its application to nonlinear systems." *Fuzzy sets and Systems* 115.2 (2000): 205-230.

[4] Takagi, Tomohiro, and Michio Sugeno. "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control." *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on* 1 (1985): 116-132.

[5] Oh, Sung-Kwun, et al. "Parameter estimation of fuzzy controller and its application to inverted pendulum." *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 17.1 (2004): 37-60.

[6] L.A Zadeh "Fuzzy sets," *Inf. contol* 8, pp.338-353, 1965.

[7] Zhao, Z., and C. Chen. "Concrete bridge deterioration diagnosis using fuzzy inference system." *Advances in Engineering Software* 32.4 (2001): 317-325.

[8] Mofizul Islam, S., Tony Wu, and Gerard Ledwich. "A novel fuzzy logic approach to transformer fault diagnosis." *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on* 7.2 (2000): 177-186.

[9] Bhalla, Deepika, Raj Kumar Bansal, and Hari Om Gupta. "Transformer incipient fault diagnosis based on DGA using fuzzy logic." *Power Electronics (IICPE), 2010 India International Conference on. IEEE, 2011.*

[10] Malik, H., N. Kushwaha, and A. K. Yadav. "Paper insulation deterioration estimation of power transformer using fuzzy-logic." *India Conference (INDICON), 2011 Annual IEEE. IEEE, 2011.*

[11] Dhote, Nitin K., and J. B. Helonde. "Improvement in Transformer Diagnosis by DGA using Fuzzy Logic." *Journal of Electrical Engineering & Technology* 9.2 (2014): 615-621

[12] Pallavi, Patil, and Ingle Vikal. "Obtaining a high Accurate Fault Classification of Power Transformer based on Dissolved Gas Analysis using ANFIS." *Research Journal of Recent Sciences, ISSN 2277* (2012): 2502.

[13] Jadin, Mohd Shawal, and Soib Taib. "Recent progress in diagnosing the reliability of electrical equipment by using infrared thermography." *Infrared Physics & Technology* 55.4 (2012): 236-245.

[14] Cao, Yang, Xiao-ming Gu, and Qi Jin. "Infrared technology in the fault diagnosis of substation equipment." *Electricity Distribution, 2008. CICED 2008. China International Conference on. IEEE, 2008.*

[15] Balaras, C. A., and A. A. Argiriou. "Infrared thermography for building diagnostics." *Energy and buildings* 34.2 (2002): 171-183.

[16] Younus, Ali, and Bo-Suk Yang. "Intelligent fault diagnosis of rotating machinery using infrared thermal image." *Expert Systems with Applications* 39.2 (2012): 2082-2091.

[17] Bagavathiappan, S., et al. "Infrared thermography for condition monitoring - a review." *Infrared Physics & Technology* 60 (2013): 35-55.

[18] Huda, A. S., and Soib Taib. "Application of infrared

thermography for predictive/preventive maintenance of thermal defect in electrical equipment." Applied Thermal Engineering 61.2 (2013): 220-227.

저 자 소 개



최 우 용(Woo-Yong Choi)

2013년 : 수원대학교 전기공학과 졸업
2015년 : 수원대학교 전기공학과 석사과정졸업
관심분야 : 뉴럴 네트워크, Granular Computing, 진화론적 최적화 알고리즘, 퍼지 추론 시스템 등.
Phone : 031-222-6544
E-mail : choiwy@suwon.ac.kr



김 종 범(Jong-Bum Kim)

2014년 : 수원대학교 전기공학과 공학사
2014년~현재 : 수원대학교 전기공학과 석사과정
관심분야 : 뉴럴 네트워크, 퍼지 추론 시스템, Patten분류 및 퍼지 모델링
Phone : 031-222-6544
E-mail : jongbum23@suwon.ac.kr



오 성 권(Sung-Kwun Oh)

1981년 : 연세대학교 전기공학과 공학사
1983년~1989년 : 금성산전연구소(선임연구원)
1993년 : 연세대학교 전기공학과 공학박사
1996년~1997년 : 캐나다 Manitoba 대학 전기 및 컴퓨터 공학과 Post-Doc.
1993년~2004년 : 원광대학교 전기전자 및

정보공학부 교수

2005년~현재 : 수원대학교 전기공학과 교수

2002년~현재 : 대한전기학회, 제어로봇시스템학회, 퍼지 및 지능시스템학회 편집위원

관심분야 : 퍼지 시스템, 퍼지-뉴럴 네트워크, 자동화 시스템, 고급 Computational Intelligence, 지능제어 등.

Phone : 031-229-8162, E-mail : ohsk@suwon.ac.kr



김 영 일(Young-Il Kim)

1983년 : 숭실대학교 전기공학과 공학사
1985년 : 연세대학교 전기공학과 공학석사
1987~1989년 : 금성산전연구소(선임연구원)
1989년 : 연세대학교 전기공학과 공학박사
1989년~1992년 : 동해중앙연구소 연구개발(연구 소장)

1992년~현재 : 대림대학교 전기공학과 교수

2010년~현재 : G2power(주) 연구개발 총괄(대표 이사)

관심분야 : 임베디드 시스템, 자동 제어 시스템, 신재생 에너지, 네트워크 보안 등.

Phone : 031-427-1261, E-mail : yikim@g2p.co.kr