

퍼지알고리즘을 이용한 전기전자기기의 안전진단방법에 대한 연구

이재철
성결대학교 정보통신공학부

Study on the method of safety diagnosis of electrical equipments using fuzzy algorithm

Jae-Cheol Lee

Division of Information and Communication Engineering, Sungkyul University

요 약 최근 전기기기로 인한 화재발생이 급증함에 따라 기기에 대한 안전진단의 필요성이 높아지고 있다. 본 연구는 지능형의 Fuzzy기술을 이용한 전기기기의 안전진단에 관한 것으로 기기의 사용전류특성, 누적사용시간, 열화특성 및 Arc특성 등의 복합적인 전기안전 요인을 검출하여 진단한다. 이들 안전요인을 실시간으로 추출하기 위하여 각종 Sensor회로, DSP(Digital Signal Processor) 신호처리회로, 무선통신회로 등으로 구성된 Board를 설계하였고, 추출된 4가지 진단정보를 이용하여, 기기의 안전정도를 퍼지수치 값으로 표시하기 위하여 각 정보마다 Gaussian function을 사용한 퍼지 알고리즘을 설계하고 DSP에 실장 하였다. 지능적인 퍼지알고리즘은 4가지의 진단정보를 입력받아 퍼지엔진으로 추론하고 해당기기의 종합적인 안전 상태를 사람의 감성에 익숙한 100단계의 아날로그 퍼지 값으로 출력한다. 본 연구에서 구현된 DSP 하드웨어와 퍼지 알고리즘을 융합한 보드의 실험을 통하여, 전기기기의 운전 중 실시간 안전 상태를 복합적으로 검출하고, 사람에게 친화적인 감성적 퍼지 값으로 진단결과를 출력하는 기능을 소형의 DSP Board에서 구현할 수 있음을 입증하였다. 향후 인공 지능 전용 Micom이 출시된다면 기능을 바탕으로 보다 진보된 진단 시스템을 연구할 수 있을 것으로 기대한다.

주제어 : 퍼지, 가우시안, 안전진단, 아크, FFT

Abstract Recently, the necessity of safety diagnosis of electrical devices has been increasing as the fire caused by electric devices has increased rapidly. This study is concerned with the safety diagnosis of electric equipment using intelligent Fuzzy technology. It is used as a diagnostic input for the multiple electrical safety factors such as the use current, cumulative use time, deterioration and arc characteristics inherent to the equipment. In order to extract these information in real time, a device composed of various sensor circuits, DSP signal processing, and communication circuit is implemented. The fuzzy logic algorithm using the Gaussian function for each information is designed and compiled to be implemented on a small DSP board. The fuzzy logic receives the four diagnostic information, deduces it by the fuzzy engine, and outputs the overall safety status of the device as a 100-step analog fuzzy value familiar to human sensibility.

By experiments of a device that combines hardware and fuzzy algorithm implemented in this study, it is verified that it can be implemented in a small DSP board with human-friendly fuzzy value, diagnosing real-time safety conditions during operation of electric equipment. In the future, we expect to be able to study more intelligent diagnostic systems based on artificial intelligent with AI dedicated Micom.

Key Words : Fuzzy, Gaussian, Safety diagnosis, Arc, FFT

1. 서론

우리의 일상생활에 전기기기의 사용은 필수적이다. 최근 전기기기로 인한 화재발생으로 인명과 재산의 피해가 급증하고 있지만 사용하는 전기기기에 대한 안전 상태를 종합적으로 실시간 진단할 수 있는 장치는 없다.

지금까지 회사나 가정에서 사용하는 주요 기기들은 과전류, 단락, 서지(Surge)들로 부터 기기를 보호하기 위하여 퓨즈나 차단기를 사용하거나 또는 정기적인 검사를 통해 누설저항 측정이나 단락시험 등으로 전기적 기계적 안전점검을 하는 경우가 대부분이었다. 간혹 고가의 Arc 측정기를 부착 경우가 있지만 매우 드물고 실제로는 기기가 동작하는 상태에서 상시 안전을 진단하거나 위험을 예고하는 진단장치는 부재하다.

전기안전사고의 주요원인을 살펴보면 과전류, 단락, 누전, 열화, Arc현상 등으로 다양하다. 특히 이들 중에서 열화나 Arc로 인한 것들은 차단기로는 감지할 수 없을 뿐만 아니라 사전에 예측하기가 어렵기 때문에 이로 인한 안전사고를 진단하고 예방하기는 더욱 어렵다. 기기의 누적사용시간 역시 전기 안전에 영향을 미치고 있지만 일상적으로 무시되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 기기의 전기적인 안전사고의 주요 요인으로 볼 수 있는 전기기기의 누적사용시간, 시간에 따른 사용전류특성, 열화특성, 전기기기의 내에서 발생하는 Arc특성 등의 4가지 주요 정보들을 전기기기의 가동 중에 상시 추출하는 기법과 이들을 감지하는 DSP기반의 하드웨어장치를 설계하였다.

또한 추출된 진단정보들을 정교화 및 퍼지 화 과정을 통하여 신호처리하고 이를 바탕으로 종합적인 안전진단 값을 실시간으로 출력하는 지능적인 퍼지알고리즘을 설계하였고 DSP 보드에 탑재하였다[1].

특히 기기의 안전진단 값은, 실험과정을 통하여 경험적 반복학습으로 설계된 퍼지알고리즘을 적용하여 인간의 감성에 익숙한 0-100% 사이의 100단계의 아날로그 값으로 표시하도록 하였고 이는 고 성능의 처리를 요구하는 향후 인공지능 AI(Artificial Intelligence) 기술을 이용한 개발의 사전연구로 활용 가치가 있다.

2. 본론

본 연구를 위하여 전류 및 전압감지, 신호처리, 통신,

진단표시 등으로 구성된 하드웨어장치를 설계 제작한다.

또한 인간의 감성이 가까운 정확한 안전진단 결과를 얻기 위하여 MatLab 2009a 개발환경에서 반복적인 실험을 바탕으로 퍼지알고리즘을 설계한다.

2.1 본 연구의 구성도

Fig. 1은 본 연구 하드웨어장치의 구성도 이다.

전기기기의 AC상용전원에 흐르는 전류를 감지하기 위하여 고 정밀도의 CT(Current transformer)를 사용하고 외부의 Filter회로를 통하여 DSP(Digital Signal Processing) 내부에 있는 AD변환기에서 처리하도록 하였다. 전압과 Arc 신호를 감지하기 위하여 AC입력부에 차동 OP-AMP를 사용하고, 요구된 Arc신호를 추출하기 위하여 HPF(High pass filter)를 사용하여 100Khz 이상의 고주파 성분만을 추출하였다.

DSP는 TI사에서 출시한 200MHZ의 고속 Dual-core Processor인 TMS320F28375D를 사용하고 Core 내부에 Filter 및 FPU(Floating Point Unit) 기능, 12bit ADC변환기 등을 이용하여 전류 및 전압 신호를 Digital FFT 및 Filter를 통하여 각종신호를 추출하고 분석하도록 하였다 (MatLab[2], TI DSP[3]).

BLE (Bluetooth Low Energy)통신부는 스마트 모바일 기기를 이용한 무선으로 관리가 가능하도록 한다[4, 5].

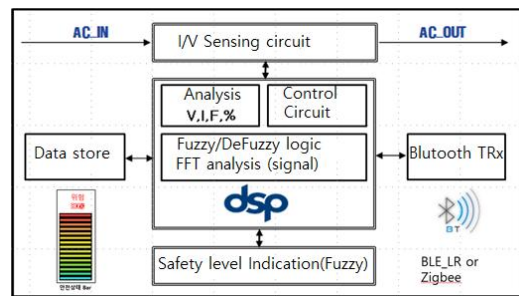


Fig. 1. Function block diagram

하드웨어의 주요사양은 아래와 같다.

- DSP : TMS320F28375D DSP Processor [3, 6]
- FPU (2ea) : Floating point 연산이 가능
- 신호분석 : Internal FFT, Filter function 사용
- CPU (2ea) : 범용 32비트 200Mhz Processor
- Fuzzy 알고리즘 구현 및 신호처리에 각각 사용
- Flash Memory : 512KB x 2ea
- RAM : 102KB x2ea

ADC (2ea) : 12bit resolution

- 전류센서 CT (Current transformer)
- 통신 : BLE4.1 stack support [7, 8]
- 전압센서 (Differential OP-AMP) [9, 10]
- 데이터 저장장치 : EEPROM (1Mbit)

2.2 복합적인 안전진단 입력정보의 검출

본 연구에서 사용하는 검출된 안전진단 입력정보는 열화특성, Arc특성, 누적사용시간, 전류변화율의 4가지이다. 이들 안전진단 정보 중에서 열화특성이나 Arc 특성은 아래와 같이 특별한 연산기법을 사용하였다.

Fig. 2는 기기의 열화특성을 감지하는 기법으로 기기 내부의 부품열화나 누설로 기인하는 고유사용전류의 시간에 따른 미세 변화량을 추출하여 열화특성을 얻어낸다. 본 연구에서는 정격전류 변화의 기울기를 추출하고 월간 누적변화율을 추적하여 기기의 열화특성을 얻었다.

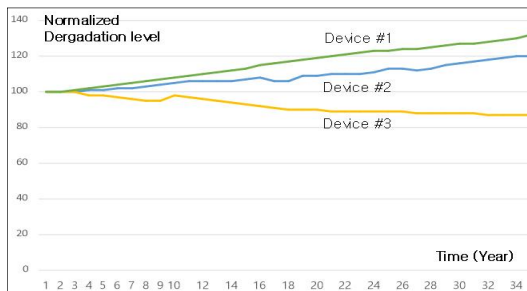


Fig. 2. Electrical degradation

Fig. 3은 기기의 Arc특성을 감지하는 기법으로 기기 내부회로의 순간단락이나 접촉 불량으로 인한 기기의 상용전원에 포함되는 Arc성분 100KHZ 이상의 고주파 Spike 전압을 시간에 따른 빈도 및 크기를 누적하여 감지한다. 본 연구에서는 시간당 발생회수 및 누적 값을 구하여 Arc특성을 얻었다.

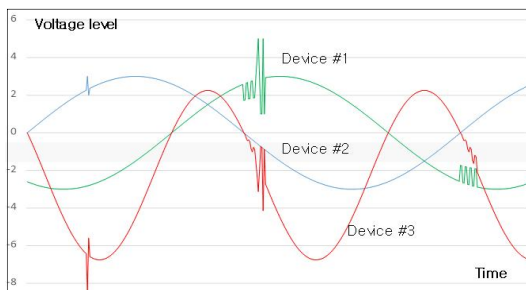


Fig. 3. Arc characteristics

누적사용시간은 초기에 사용자가 입력하도록 하였고 실시간으로 사용시간을 누적하여 10만 시간을 최대치로 설정한다. 사용전류의 변화율은 현재전류의 분당 전류변화량을 추적하여 얻었다.

이와 같은 감지방법을 통하여 얻어진 전기기기의 Arc 특성, 열화특성과 누적사용시간, 전류특성 등을 퍼지엔진에 0-100 사이의 정규화 한 값으로 입력하고, 본 연구를 통한 반복실험의 경험적 규칙으로 만들어진 퍼지추론 알고리즘을 통하여 전기기기의 각 요소별 안전지표 및 종합적인 안전지표를 100단계의 아날로그 값으로 실시간 진단하고 표시한다.

2.3 퍼지알고리즘 설계와 안전특성 진단

퍼지엔진은 정규화(Normalize) 된 4가지의 입력 데이터를 퍼지 화된 수치로 변환하는 퍼지 화 과정, 경험에 의하여 설계된 규칙기반으로 추론하는 퍼지추론 과정, 추론 값을 외부 신호출력으로 표현하는 역 퍼지화의 3단계 과정을 거쳐서 추론 결과 치를 얻어낸다.

본 연구에서는 MatLab을 이용하여 퍼지알고리즘을 구현하였고 퍼지알고리즘을 설계하는 과정에서는 4종류의 진단요소 별 입력을 이용하여 144개의 퍼지규칙을 설계하였고 퍼지추론 연산에서는 MIN-MAX 기법을, 역 퍼지 화 과정에서는 무게중심 기법을 사용하였다[1, 2].

2.3.1 퍼지화 (Fuzzification)

입력과 출력 값들을 소속 함수로 퍼지 변환하는 과정으로 본 연구에서는 열화특성, Arc특성, 누적사용시간, 현재전류 등 4개의 입력과, 1개의 Rate 출력을 Gaussian function을 이용하여 퍼지 화하였다. 아래는 각 입력과 출력에 해당하는 정규화(Normalize) 된 입력변수 값 및 출력의 값에 따른 소속도 함수를 나타낸 것이다[11, 13].

입력과 출력의 정규화 과정에서는 실제 진단추정치에 근접한 분포 값을 얻기 위하여 실험을 통해 얻어진 경험치를 바탕으로 가우시안 분포도를 적용하였다[12].

가. 전류특성의 정규화 및 퍼지화

Fig. 4는 기기에 흐르는 현재전류 흐름의 변화 값을 정규화(분당 전류변화량) 하여 입력 값의 범위를 0-100% 사이로 조정하고 Gaussian function을 이용하여 4단계의 소속 퍼지집합(Normal, Average, Warning, Danger) 으로 할당하였다. 즉 전류의 변화 값이 10%미만은 Normal,

18%를 중심으로 Average, 28%를 중심으로 Warning, 40% 이상은 Danger로 모두 4단계로 퍼지 화 한다.

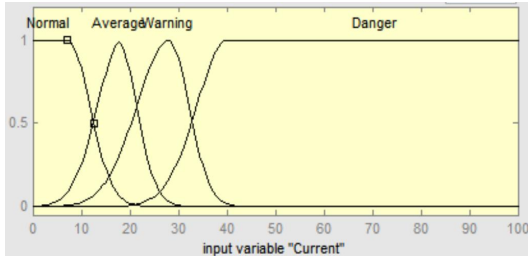


Fig. 4. Input Membership function for Current

나. Arc특성의 정규화 및 퍼지화

Fig. 5는 얻어진 Arc 입력 값을 0-100% 사이의 값으로 정규화(시간당 발생회수 및 누적 크기)하고 Gaussian function을 이용 하여 3단계의 소속 퍼지집합 (Normal, Warning, Danger) 으로 할당하였다[14-17].

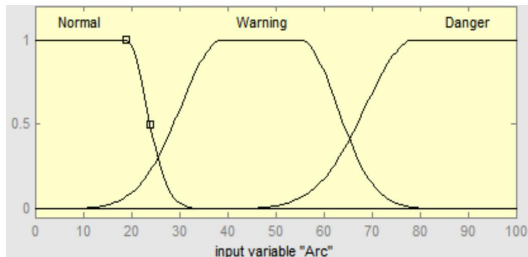


Fig. 5. Input Membership function for Arc

다. 열화특성의 정규화 및 퍼지 화

Fig. 6은 측정된 열화특성의 입력 값을 정규화(월간 전류변화의 기울기)하여 입력범위 0-100%로 하고 Gaussian function을 이용하여 4단계의 소속 퍼지집합 (Normal, Average, Warning, Danger) 으로 할당하였다.

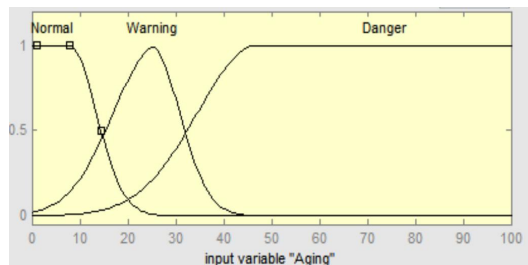


Fig. 6. Input Membership function for Aging

라. 사용시간의 정규화 및 퍼지화

Fig. 7은 사용시간 특성의 값을 정규화(사용시간 10만 시간을 100%로 정규화)하여 입력범위 0-100%로 하고 Gaussian function을 이용하여 4단계의 소속 퍼지집합 (Normal, Average, Warning, Danger) 으로 할당하였다.

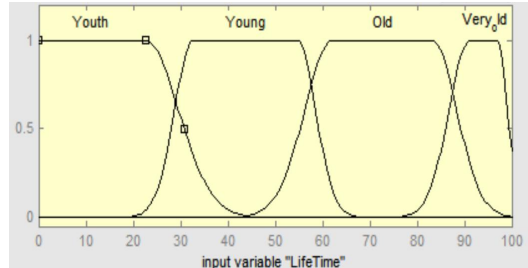


Fig. 7. Input Membership function for Lifetime

마. 출력 Rate의 정규화 및 퍼지화

Fig. 8은 퍼지 알고리즘을 이용하여 얻어진 출력 rate 값을 정규화 하여 출력범위 0-100%로 하고 Gaussian function을 이용하여 4단계의 소속 퍼지 집합(Normal, Average, Warning, Danger) 으로 할당 하였다.

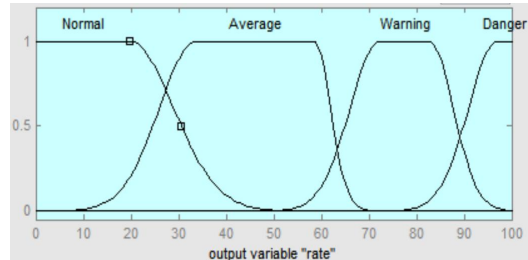


Fig. 8. Output Membership function for RATE

2.3.2 퍼지추론 (Fuzzy inference engine)

퍼지추론 규칙은 퍼지집합, 입력변수, 출력 변수들 사이의 연관된 규칙의 집합이다. 이 과정에서 진단추정치에 근접한 퍼지 값을 얻기 위하여 실험을 통해 얻어진 경험치를 바탕으로 퍼지추론 엔진을 설계하였다.

Fig. 9는 퍼지규칙을 나열하는 것으로 본 연구의 규칙 개수는 입력변수의 퍼지집합인 현재전류(4), Arc(3) 열화(3), 사용시간(4) 조합으로 구성된 총 144개 이다. 각 규칙에 대한 퍼지추론 합성연산에는 MAX-MIN 기법을 사용하였다[2].

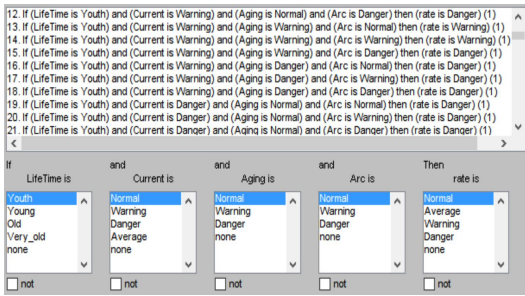


Fig. 9. Fuzzy inference rule design

2.3.3 역 퍼지화 (De-fuzzification)

입력변수를 이용한 규칙기반의 결과 값을 출력 퍼지 집합에 각 출력 소속 함수에 소속되는 실제의 퍼지소속 값으로 Matching하여 진단에 사용하는 결과 값을 얻어 내는 과정으로 본 연구에서는 무게중심 법(Centroid)을 사용하였다[2].

3. 측정결과

3.1 시험환경

본 연구의 실증적인 실험을 위하여 Fig. 10과 같이 안전진단 장치를 제작하였다. 지금까지 열거한 감지 부, DSP 부, 저장 부, 통신 부 등 마이크로프로세서와 주변장치 등의 모든 기능을 하나의 보드에 실장 하였다.

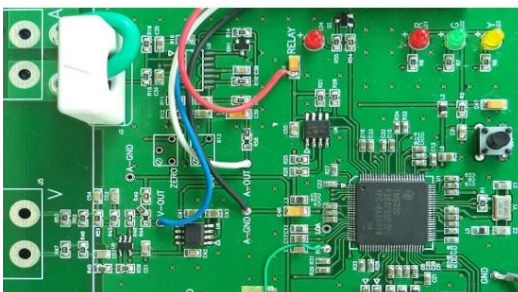


Fig. 10. Experimental Test board

DSP board에는 MatLab에서 설계한 Fuzzy 엔진의 알고리즘을 적재하고 각 4가지 진단요소 별 정규화(Normalize) 된 입력 값을 이용하여 아래와 같은 3가지의 방법으로 검증하였다. 연구에 사용된 MatLab은 R2009a Version으로 최근에 출시된 2016 version에서도 호환성이 있다[2].

3.2 시험결과

가. MatLab simulation

Fig. 11은 Mathwork사에서 제공하는 Simulink기능을 이용하여, 본 연구를 통하여 설계한 퍼지알고리즘을 검증하는 것으로 입력 4가지의 변수에 0-100으로 정규화된 임의의 난수 값을 입력하여 실험하였다.

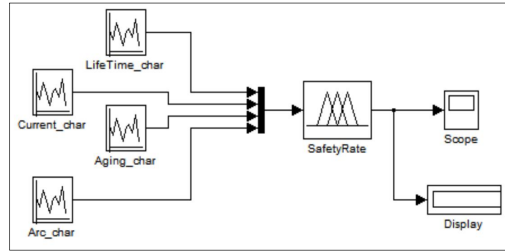


Fig. 11. Fuzzy simulation model

Fig. 12는 simulation의 퍼지 출력신호를 관찰한 것이다. x축은 시간을 나타내고 y축은 안전진단 퍼지 출력(Rate) 값으로 입력에 따라 0-100%의 정규화된 아날로그 값으로 표시됨을 볼 수 있다. 이는 설계된 퍼지 알고리즘 즉 퍼지추론 엔진이 입력 값의 변화에 대응하여 정상적으로 동작하고 있음을 검증하는 것이다.

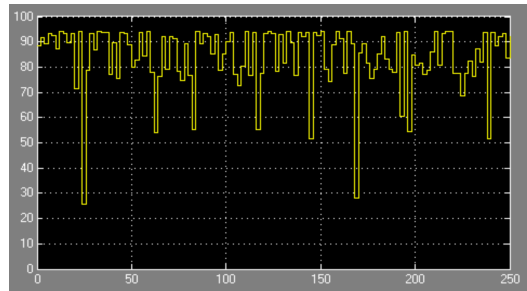


Fig. 12. Simulation waveform

나. Rule simulation

Fig. 13은 MatLab에서 제공하는 Rule simulation 기능을 사용하여, 설계한 퍼지알고리즘을 검증하는 것으로, 수동으로 커서를 이동하여 4가지의 요소 값을 가변 입력하면서 퍼지출력(Rate) 값의 변화를 관측한 것이다. 입력은 0-100%의 값으로 각 입력의 크기정도를 퍼지 추론엔진에 입력하기 위하여 정규화 시킨 수치이다.

4가지 진단입력의 조합에 따라 출력(Rate) 값이 0-100 사이의 100단계의 아날로그 값으로 표시됨을 확인할 수

있었다.

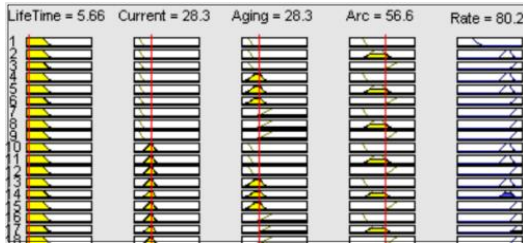


Fig. 13. Input Combination and Output rate

다. Board 시험

본 연구의 DSP board에서 퍼지알고리즘을 이용한 안전진단 결과를 시험하기 위하여 전기기기 대신에 정격 1A 의사 부하저항을 연결하고 AC교류신호를 연결하였다. 공급한 AC교류 신호에 Fig. 14와 같은 4가지의 의사 진단입력의 다양한 조합을 발생하여 실험하였다. 의사 열화신호(Degradation)를 발생하기 위하여 부하저항을 미세 가변하였고, 의사 Arc신호를 발생하기 위하여 100KHZ의 교류 Burst 신호발생장치를 사용하였다.

전류(Current), 누적사용시간(Time use) 등은 실험 초기에 입력함으로 필요한 4가지의 모든 Fuzzy inputs 조합을 만들어낼 수 있었다.

Fuzzy Inputs				Fuzzy Outputs	
Current	Degradation	Arc	Time use(h)	De-fuzzy(100)	Rate (4)
1.0A	0% (1.0A)	0	1.0% (1,000)	23	Normal
1.3A	30% (1.3A)	0	1.0% (1,000)	86	Warning
1.5A	50% (1.5A)	0	1.0% (1,000)	92	Danger
1.1A	0% (1.0A)	0	10% (10,000)	46	Average
1.0A	0% (1.0A)	10% (1ea x100KHz/h)	1.0% (1,000)	78	Warning
1.0A	0%	50% (5ea x100KHz/h)	10% (10,000)	95	Danger
1.28A	28%	50% (5ea x100KHz/h)	5.0% (5,000)	85	Warning

Fig. 14. Fuzzy output test on the board

4가지의 입력 안전정보의 임의 조합에 따른 안전진단 퍼지결과 값이 4단계의 Normal, Average, Warning, Danger로 구분할 뿐 아니라 인간의 감성에 가까운 0-100% 사이의 아날로그 값으로 표현하여 보다 실감 있는 안전 진단으로 활용이 가능하고 이 값은 Simulation 값인 Fig. 13과 매우 유사함을 검증하였다.

여기서 결과 값이 0에 가까울수록 안전하고 반대로 100에 가까울수록 위험도가 높다는 의미이다.

출력된 퍼지 값이 90 이상으로 진단 시에는 화재 위험

성을 “Danger”로 판단하여 전원을 즉시 차단하는 기능을 추가로 확인하였다[18].

4. 결론

전기기기의 안전은 매우 중요하다. 통상적으로 가정이나 산업현장에서 사용하는 전기기기의 안전 상태에는 다양한 요인이 있고 이들은 육안으로 확인할 수 있는 것이 아니기 때문에 실시간 운전 상태에서 복합적인 요인을 고려하지 않으면 정확한 안전을 진단하기가 어렵다.

본 연구에서는, 전기안전에 영향을 미치는 다양한 요인 중에서 전기기기가 사용 중에 발생시키는 Arc 및 열화 특성과 누적사용시간, 현재전류특성 등을 운전 중 검출하고, 검출된 정보들을 인공지능에 가까운 퍼지기술을 사용하여 사람의 감성에 근접한 지능적인 안전진단 값을 얻는 퍼지 알고리즘을 설계하고, 그리고 이들 기술을 소형의 DSP 하드웨어에서 구현하여 동작을 시험함으로써 보다 정확하고 지능적인 전기기기 안전진단장치가 저 가격으로 실용 가능성이 있음을 검증하여 보았다.

구현된 퍼지알고리즘 모듈의 크기는 약 220Mbyte 정도의 크기로 16비트 Micro processor 또는 DSP를 이용하여 실용화가 가능하였다. 현재 Deep learning 기술을 이용하여 지능형 진단시스템을 개발하려는 시도가 있지만 고가로 인하여 상용화가 어려운 실정이다. 하지만 향후 인공지능을 처리하는 Micro - processor가 출시된다면 보다 인간의 감성에 가까운 안전 진단정보를 얻어내는 진단기 제품이 상용화 될 수 있을 것으로 기대한다.

또한 본 논문의 연구과정에서 얻어진 DSP의 신호처리를 기반으로 하는 다양한 안전진단 신호의 검출기법과 반복적이고 경험적인 퍼지 학습을 통해 얻어진 알고리즘 개발의 결과는 향후 Deep learning을 이용한 진단장치 개발 시에 요구되는 진단요소 검출 및 경험적 학습 결과를 구하는데 유용하게 활용할 수 있다.

REFERENCES

[1] S. Y. Choi & H. C. Ahn. (2015). Optimized Bankruptcy Prediction through Combining SVM with Fuzzy Theory. *Journal of Digital Convergence*, 13(3), 155-165.
 [2] The mathworks. (2009). MATLAB R2009a : The

Mathworks publisher.

- [3] Texas Instrument. (2013). TMS320F2837xD dual-core Delfino Microcontroller : Texas Instrument.
- [4] G. J. Kim & J. S. Han. (2014). Chronic Disease Management using Smart Mobile Device. *Journal of Digital Convergence*, 12(4), 335-342.
- [5] B. C. Chung & W. S. Na. (2016). A Study on the Smart Fire Detection System using the Wireless Communication. *Journal of Convergence for Information Technology*, 6(3), 37-41.
- [6] Texas Instrument. (2013). TMS320F2837xD dual-core Delfino Micro-controller Technical Reference manual : Texas Instrument.
- [7] Chipsen Inc. (2016). Bot-CLE310 Specification : Chipsen Inc.
- [8] Chipsen Inc. (2016). Bot-CLE310 Protocol : Chipsen Inc.
- [9] Texas Instrument. (2011). TPS6208x 1.2A High-efficiency, stepdown converter with DCS-control : Texas Instrument.
- [10] Monolithic Power. (2016). MP2159 synchronous Step-down switcher : Monolithic Power.
- [11] S. H. Oh. (2015). A Fuzzy Linear Programming Problem with Fuzzy Convergent Equality Constraints. *Journal of the Korea Convergence Society*, 6(5), 227-232.
- [12] G. W. Jin. (2017). A Study on the BGA Package Measurement using Noise Reduction Filters. *Journal of the Korea Convergence Society*, 8(11), 15-20.
- [13] Xue-Wei Tian, & J. S. Lim. (2013). Learning Distribution Graphs Using a Neuro-Fuzzy Network for Naive Bayesian Classifier. *Journal of Digital Convergence*, 11(11), 409-414.
- [14] H. K. Ji, K. S. Jung & G. S. Kil. (2010). Detection technique and device of series arcing phenomena. *Journal of the Korean society of Marin Engineering*, 34, 332-338.
- [15] D. H. Kim & J. Y. Park. (2010). Development of Monitoring program for detecting current and voltage signals for series arc. *Journal of the KOSOS*, 25(2), 29-30.
- [16] K. J. Park. (2009). *The method of series arc detection*. SEOUL : Korean intellectual property office.
- [17] H. W. Kim & D. H. Back. (2012). The study on detection of serial arc and fire flame by poor contact. *Korean Institute of Fire science & Engineering*, 26(6), 24-30.
- [18] T. Y. Jeong & D. S. Kim. (2010). *Power cut-off device that can block power supply by sensing various arcs and overloads*. SEOUL : Korean intellectual property office.

이 재 철(Lee, Jae Cheol)

[정회원]



- 1998년 2월 : 성균관대학교 정보공학과(공학석사)
- 2008년 12월 : 목원대학교 IT공학과(공학박사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 성결대학교 정보통신공학과 교수
- 관심분야 : 스마트그리드, 영상보안, 임베디드설계, 인공지능
- E-Mail : jcllee@sungkyul.ac.kr