

## Development of Control Algorithm and Detection of the Small Leakage Current

潘基宗\* · 金洛教\*\*  
(Gi-Jong Ban · Lark Kyo Kim)

**Abstract** - In this paper, we have designed the ground faults detection and interrupting controller at normal condition of AC 120V to 240V rating voltage. Ground faults in electrical network have the characteristics of low current, 60Hz frequency to 2kHz frequency. The load condition are no load and 20A load. The trip level of the controller is 6mA with ground faults. The Controller algorithm is implemented using pic16c71 microprocessor

**Key Words** : Leakage , Interrupter , Load contion, Ground Fault

### 1. 서론

전기가 발명된 이래로 전기는 인류에 많은 공헌을 하였고, 없어서는 안 될 필요불가결한 것이 되어 있다. 그러나 이런 편리함을 주는 것임에도 불구하고 많은 피해를 주고 있다.

그 중에서도 전기로 인한 감전, 화재 등을 대표로 볼 수 있다. 매년 다수의 감전 및 화재사고가 발생하고 있으며 이로 인한 인적 물적인 피해가 매우 크게 나타나고 있다. 2001년 발생한 전기 감전 및 전기재해의 피해를 표 1에 나타내었다. 따라서 이러한 전기로 인한 재해를 방지하기 위해 낮은 누전 전류를 검출하기 위하여, 본 논문에서는 15mA 및 6mA의 누전을 검출할 수 있는 알고리즘을 설계하고자 하드웨어를 설계하고 낮은 누전전류에서도 선형적으로 전류를 검출 할 수 있는 검출센서를 설계하였으며 제어 알고리즘을 적용하기 위하여 RISC 타입의 PIC16C71을 사용하였다[1][2].

전기계통에서 발생하는 누전전류를 검출하여 차단하는 것은 1930년경 배전 전압이 높은 유럽에서 절연 파괴된 전기 기기에서의 발생하는 감전사를 방지하기 위하여 사용되기 시작하였고 일본의 경우에는 1964년부터 건설현장 등에서 발생하는 감전을 방지하기 위하여 사용하기 시작하였다. 또한 국내에서는 이보다 늦은 1976년에 누전 차단기에 대한 규정을 제정하여 사용되기 시작하였다.

각국마다 규정하는 누전전류의 차단 용량에는 많은 차이가 있으며 전원전압이 높은 유럽의 경우 30mA로 규정되어 있고, 북미의 경우에는 6mA로 낮은 전류로 제한되어 있

며 국내의 경우 30mA로 되어 있다.

30mA의 차단레벨은 인구의 90%정도의 보호를 목적으로 하며 6mA의 경우 인구의 99.5%의 보호를 목적으로 한다. 본 논문에서는 누전전류의 규격이 30mA로 규정되어 있음에도 불구하고 감전 및 누전으로 인한 화재가 다수 발생하는 것을 방지하여 인명피해 및 재산피해를 최소화 할 수 있도록 하기 위하여 정격전압 120V에서 240V, 누전전류는 6mA에서 15mA의 감도 전류를 검출하고 차단시킬 수 있는 기능을 갖는 제어기를 설계하였다[3][6][7].

### 2. 누전전류 및 센서의 특성

#### 2.1 누전전류의 기본 특성

누전 전류는 정상적으로 동작하는 전기계통에서 절연파괴 등에 의해 대지나 기타 대상을 통하여 외부로 빠져나가는 전류로 규정할 수 있다. 이 전류의 양에 따라 사람이 감지할 수 있는 차이가 발생하며 일반적으로 사람이 감지할 수 있는 감지전류는 5mA 정도로 알려져 있다.

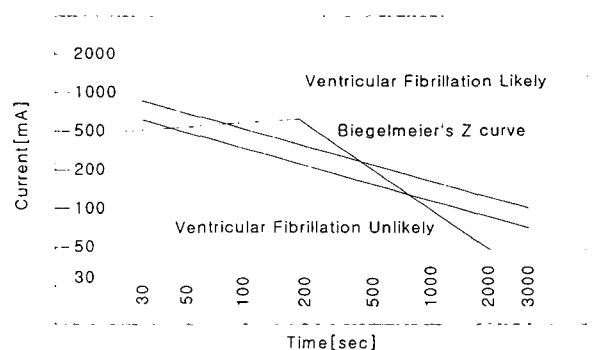


그림 1 인체 감전 전류와 통전시간 (IEEE Std 80-2000)  
Fig. 1 Electric Shock Current through Human Body and Elapsed time

\* 正 會 員 : 建國大學 電氣工學科 博士課程  
\*\* 正 會 員 : 建國大學 電氣工學科 教授 · 工博  
接受日字 : 2004년 1월 2일  
最終完了 : 2004년 1월 27일

또한 사람이 누전전류에 노출 되었을 경우 근육의 수축을 일으키는 불수의 전류는 5~20mA이며, 30mA 이상일 경우에는 인체의 심근이 경련하고 혈액순환기능에 장애를 초래하여 사망에 이를 수 있는 전류이다. 그림1은 인체의 감전 전류와 통전시간을 나타낸다.

표 1은 2001년에 발생한 전기재해 중 감전에 의한 사망과 부상자 및 일반적인 전기화재에 의한 화재건수와 재산피해를 보여준다.

표 1 전기에 의한 감전 및 전기화재(2001년)  
Table 1 Shock and Fire due to Electricity

감전에 의한 사망	감전에 의한 부상	전기화재	재산피해 (백만 원)
132	791	10,454	64,678

2.2 전류 검출 센서

검출 센서로는 일반적으로 영상전류를 검출 할 수 있는 ZCT(Zero Current Transformer)를 사용한다. 이는 코어에 코일을 환상 형태로 권선하는 형태가 사용된다. 일반적으로 금속의 투자율은 300~10,000 사이의 제품을 사용한다. 정밀하게 누전 전류를 검출하기 위해서는 일정한 부하 임피던스를 가지며 누전 자속이 0이 되어야 한다. 여자전류가 작아야 하며 무한대의 자속밀도 등의 특성을 갖는 센서를 설계하여야 한다.

부하의 임피던스가 증가함에 따라 철심의 자속도 증가하여 여자 전류가 증가하는 특성을 갖는다. 실험에 알맞은 성능을 갖기 위해서 정도와 크기 및 저 가격의 센서를 사용하였다. 일반적으로 철심의 재료는 50%의 포화자속밀도보다 적은 곳에서 좋은 정확도를 갖는다. 센서는 1차측은 적게 감고, 2차측은 많은 횟수를 감는 형태로 하며 높은 권선 비율은 많은 누전자속을 발생시킨다. 누전 자속을 줄이기 위해 환형 형태의 높은 투자율을 갖는 재료를 사용하여 밀접한 철심 결합을 하고 두 권선을 결합시키면 누전 자속을 최소화 할 수 있다. 여자 전류는 센서의 정도를 결정한다. 여자 전류는 철심의 히스테리시스와 와전류손에 해당하는 1차 측 전류의 일부로서 2차 전류는 1차 전류에서 여자 전류를 뺀 값과 비례하기 때문에 오차의 원인이 되며 오차의 크기는 1차 전류의 자화전류의 비율에 정비례한다.

센서의 설계는 부하조건을 고려하여 설계한다. 부하는 저항과 최대 출력의 전류로 결정한다. 2차측의 부하전류는 부하저항과 결합하여 2차 전압을 형성한다.

2차 전압은 식 (1)으로 나타낸다.

$$E_2 = I_2 \times R_L \tag{1}$$

(  $I_2$  : 부하전류,  $R_L$ : 부하저항 )

1차측 전류  $I_1$ 는 식(2)로 표현되며  $I_1$ 는 측정 또는 조절된 전류이므로 1차와 2차 전류의 비는 turn 비와 반비례한다.

$$I_1 = I_2 \times \frac{N_2}{N_1} \tag{2}$$

대부분의 경우 1차측은 1회이므로 1차 전류는

$$I_1 = I_2 \times N_2 \text{ 이 된다.}$$

1차측에서 사용되는 권선의 단면적은 식 (3)에 의해 결정된다.

$$A_w = \frac{A_c \times N_2}{K} \tag{3}$$

여기서 K는 권선계수로 권선간 공극과 권선 절연, 층간 절연과 관련이 있으며 2차와 1차 권선에 높은 전압이 사용되면 K값은 감소되어야 한다.

센서 다른 특성은 포화특성으로 자속밀도 B는 식 (4)로 나타낸다.

$$B = \frac{E_2 \times 10^8}{4.44 \times N_2 \times f \times A_c} \tag{4}$$

( B : 자속밀도[Gauss], f : 주파수,  $A_c$  : 유효 철심의 단면적 [  $cm^2$  ] )

철심의 자속밀도는 재료의 최대 자속밀도보다 적은가를 확인하고, 적지 않으면 보다 큰 면적의 철심을 선택하고, 계산된 자속밀도가 재료의 최대보다 작으면 단면적이 적은 철심을 사용한다[4][8][9][10].

본 실험에서는 1차 측은 1회의 권선을 하고 2차측은 1,000회의 권선을 한 전류센서를 사용하였다.

3. 누전전류 차단 제어기 설계

누전전류의 검출 원리는 키르히호프의 전류법칙을 이용하여 검출한다. 그림 2는 누전전류의 검출 원리를 나타낸다. 그림에서 정상적인 경우 부하 쪽으로 흐르는 전류를  $i_1$ , 부하에서 입력 쪽으로 feedback 되는 전류를  $i_2$ 라고 하면  $i_1 + i_2 = 0$ 의 식이 성립한다.

누전 전류가 발생하지 않은 상태에서는 센서의 내부에서 두 전류가 상쇄되어 영상전류가 되고 자장이 발생하지 않으며 센서의 출력은 0이 된다.

또한 그림에서와 같이  $i_3$ 의 전류가 외부로 누전될 때는  $i_1 + i_3 = i_2$ 이 되어  $i_1$ 과  $i_2$ 사이에서 불 평형 상태가 된다. 이때에 센서에서는 누전 양에 해당하는 자장이 생성되고 센서에서 이 값을 전압의 형태로 출력을 한다.

센서는 누전전류가 6mA보다 커지면 출력을 내도록 설계되었다.

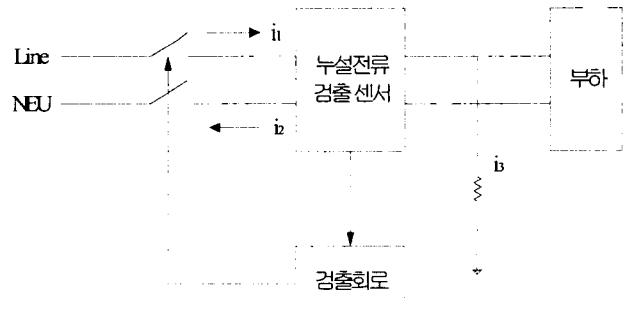


그림 2 누전 전류의 검출 원리  
Fig. 2 Sensing method of an earth leakage current

그림 3은 마이크로프로세서에 입력되는 신호로써 A와 C의 펄스폭을 측정하여 마이크로프로세서에서 연산을 하여 trigger 신호를 발생시킨다. 마이크로프로세서는 12MHz의 클럭 주파수를 갖도록 설계되었다. 또한, 8MHz에서 15MHz까지의 범위에서 사용 할 수 있도록 하였으며 클럭 주파수가 가변됨으로써 누전전류의 범위를 바꿀 수 있다[1].

센서에서 검출하는 신호는 60Hz의 전류파형을 모니터링하여 누전전류가 발생시에 두 가지 형태의 펄스폭으로 필터링한다. 제어기는 그림 3 A와 C의 두개의 신호를 받아서 두 신호의 레벨이 원하는 값에 도달하였을 때 트리거 신호를 발생한다.

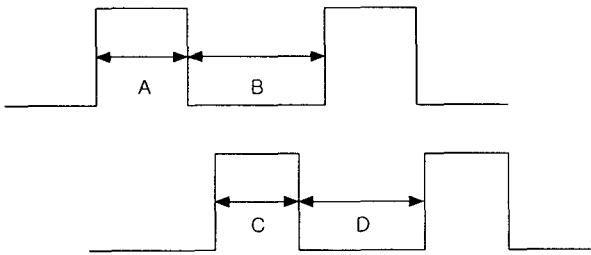


그림 3 센서에서의 누전 전류 검출  
Fig. 3 Detecting of an Earth leakage current of sensor

그림 4는 누전전류를 인위적으로 발생시키는 회로를 보여준다. 그림에서 SW1과 SW2 및 SW3의 3개의 스위치를 이용하여 실제 배선에서 발생할 수 있는 누전의 위치에 따른 누전 시험을 실시하였다. 그림에서 Line과 Neutral에 전압을 인가하고 SW1과 SW2 및 SW3을 연결한 후 가변저항을 통하여 전류계의 눈금이 4mA에서 300mA까지 가변되도록 설치하고 가변저항을 조절하여 전류계에 6mA가 흐르게 하면 센서는 누전전류를 검출하여 그림 3과 같은 펄스 파형을 발생시킨다. 이 펄스는 마이크로프로세서에 입력되고 마이크로프로세서의 연산을 통하여 트리거 펄스를 출력함으로써 부하에 흐르는 전류를 차단할 수 있도록 설계하였다. 제어기는 누전전류의 양에 따라 전류를 차단하는 시간은

$$t = \left(\frac{20}{i}\right)^{1.43} \text{로 나타낼 수 있다}[5].$$

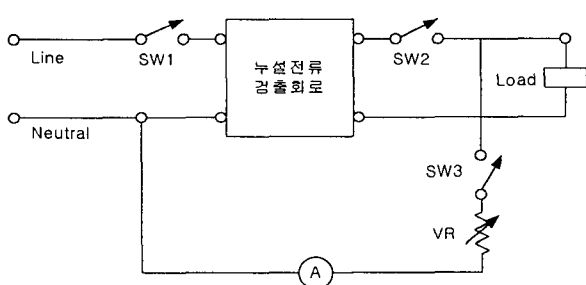


그림 4 누전 전류 실험 회로  
Fig. 4 Test circuit for the earth leakage current

본 논문에서 설계한 제어알고리즘은 부하를 갖는 경우와 부하가 없는 경우의 두 가지 형태의 실험을 통하여 성능을 판단하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 실험결과

3장에서 설계한 알고리즘을 이용하여 UL 규정을 이용하여 낮은 전류에서 높은 전류로 변동시키는 실험을 통하여 설계된 제어기의 성능을 확인하였다.

그림 5는 6mA 누전시 센서에서의 출력 파형을 나타낸다. 센서에서는 60Hz마다 누전 신호를 모니터링 하여 누전전류가 발생하면 그림과 같은 신호를 출력한다. 센서에서 검출된 신호는 노이즈 성분을 제거하고 일정 크기의 주파수 대역으로 변환한다.

센서에서 60Hz로 검출된 신호는 전파 정류 회로를 통하여 120Hz의 주파수를 갖도록 하여 프로세서에서 처리하는 시간을 단축하였다.

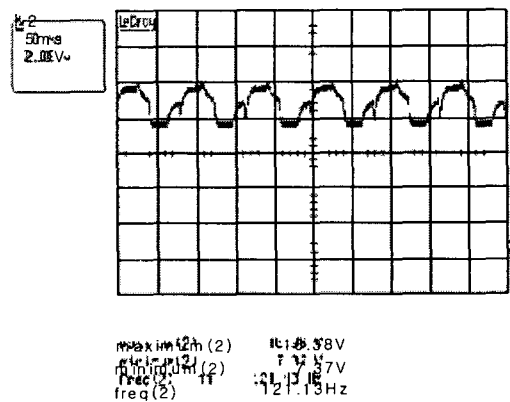


그림 5 6mA 누전시 센서의 출력  
Fig. 5 Sensor output when the 6mA leakage current occurs

그림 6.은 누전 전류를 센서에서 검출하여 마이크로프로세서에서 연산하는 알고리즘을 보여준다. 프로세서는 전원이 인가되면 기준전압이 형성되고 누전 발생시의 입력 신호와 기준 전압을 비교하여 차단 신호를 출력한다.

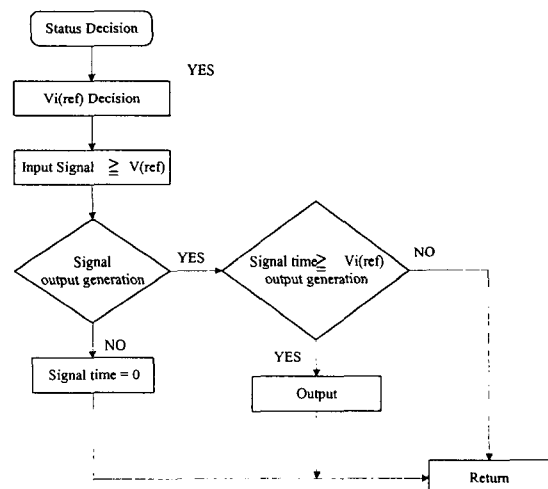


그림 6 누전전류 처리 알고리즘  
Fig. 6 Processing algorithm for the leakage current

그림 7과 그림 8은 6mA 및 264mA에서 발생하는 누전을 검출하여 마이크로프로세서에 입력하기 위한 파형을 보여주며 이 파형을 정전압 회로를 사용하여 5V의 전압 레벨로 마이크로프로세서에 인가한다. 그림에서는 누전 전류의 양에 따라서 주파수 및 전압 레벨이 변화 하는 것을 볼 수 있다.

마이크로프로세서에서는 이러한 신호들을 받아 여러 가지 실험조건에 의해 데이터화된 정보와 비교함으로써 누전 전류가 발생시에 전류를 차단할 수 있는 신호를 출력할 수 있도록 한다. 마이크로프로세서에서 출력되는 신호는 1V의 레벨을 갖는다.

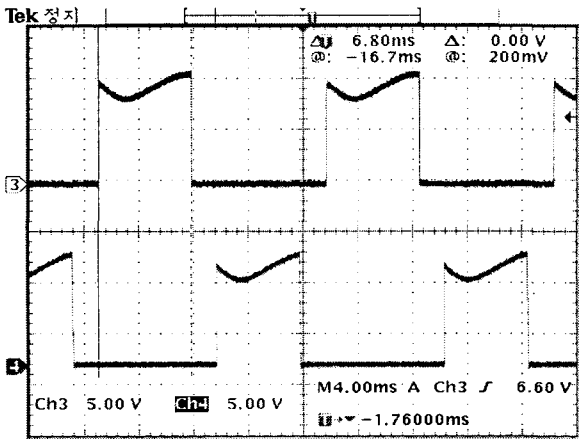


그림 7 6mA 누전발생시 필터링된 센서출력 신호  
Fig. 7 Sensor output signal when 6mA leaks

그림 7과 그림 8에서는 누전 전류의 값이 변동함에 따라 센서에서의 출력 펄스폭의 크기가

다르게 나타나는 것을 보여준다. 그림에서 나타나는 리플은 필터링을 거쳐서 구형파로 마이크로프로세서에 입력된다. 그림 7은 6mA의 누전을 발생시켰을 경우의 센서 검출 신호를 보여준다. 이 경우 파형의 펄스폭은 6.8ms를 나타낸다. 그림 8은 264mA 발생시의 센서 검출 신호를 나타낸다.

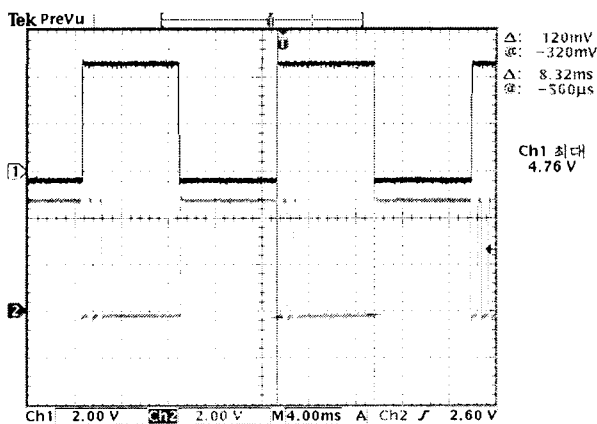


그림 8 264mA 누전 발생시 센서 검출 신호  
Fig. 8 Sensor output signal when 264mA leaks

그림에서는 1번 파형의 경우 펄스폭은 8.32ms를 나타낸다. 프로세서에서는 1번 신호와 2번 신호를 비교하여 출력 신호를 발생시키도록 설계하였다.

그림 9는 Ground와 중성선 간에서 발생하는 누전 전류를 검출한 파형으로서 2kHz대의 주파수를 갖는다. 이 경우에도 일반 누전전류와 마찬가지로 전류를 차단할 수 있도록 하였다.

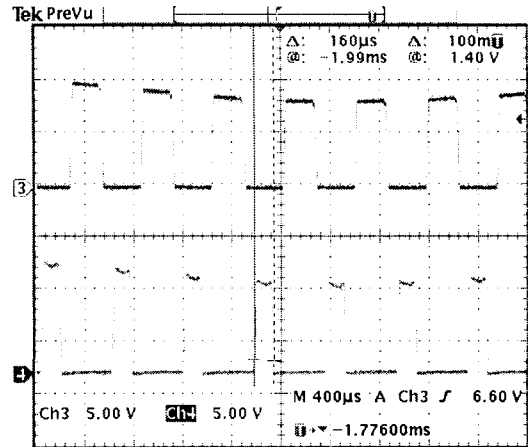


그림 9 Ground-Neutral 누전발생시 센서출력 신호  
Fig. 9 Sensor output signal when the leakage current flows from Ground to Neutral

#### 4.2 결과 고찰

그림 10과 그림 11은 본 논문에서 제안한 알고리즘을 마이크로프로세서에 실현하고 실험을 하여 누전전류가 발생하였을 경우에 부하전류 차단 시간을 보여준다. 그림 10과 그림 11에서 나타난 것과 같이 6~264mA 범위에서 누전 전류를 발생하였을 경우 25ms 이내에 부하전류를 차단함을 볼 수 있었다.

그림 10은 6mA 누전 발생시 부하전류를 차단하는 시간을 보여준다. 그림에서와 같이 누전 발생시 부하전류는 18.2ms에 차단됨을 볼 수 있었다.

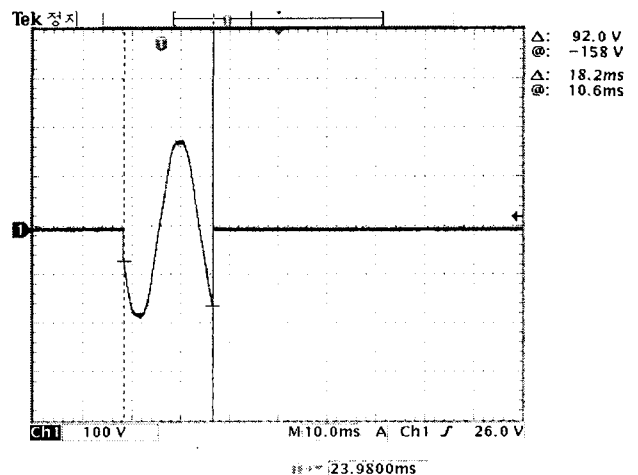


그림 10 부하 전류 제거 시간(18.2ms)  
Fig. 10 Interrupting time(18.2ms) of the load current when 6mA leaks

그림 11은 264mA의 누전을 발생했을 경우 부하전류를 차단하는 시간으로 25ms에 부하전류가 차단됨을 볼 수 있다.

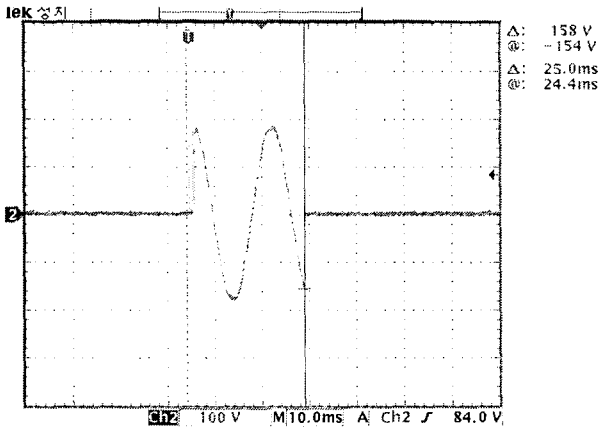


그림 11 부하 전류 제거 시간(25ms)

Fig. 11 Interrupting time(25ms) of the load current when 264mA leaks

표 2에서는 정격전압 120에서 240V, 정격전류 20A의 규정을 적용하였을 경우 6mA, 15mA 및 264mA의 세 가지의 경우에 부하전류를 차단시키는 시간을 나타낸다.

표 2 정격 전압시 부하전류 차단 시간

Table 2 Interrupting time at the nominal voltage

입력전압	정격전류	검출전류	부하전류차단 시간
120V ~ 240V	20A	6mA, 15mA	15~20ms
120V ~ 240V	20A	264mA	26ms 이내

### 5. 결 론

본 논문에서 제안한 알고리즘의 성능을 판단하기 위하여 누전 시험을 할 수 있도록 하드웨어를 설계하고 마이크로프로세서에 알고리즘을 설계하여 적용하였다. 실험을 통해 인위적으로 누전전류를 가변시키면서 누전을 발생했을 경우 요구하는 성능을 충족시킬 수 있음을 확인하였다. 일반적으로 6mA에서 264mA의 누전전류 발생시 26ms 이내에 부하전류를 차단하여야 한다. 설계한 제어기는 15ms에서 25ms 내에 부하전류를 차단함을 확인하였다. 본 논문에서 제안한 미소 누전전류 검출 알고리즘을 누전 차단기에 적용할 경우 전기로 인한 인적, 물적 피해가 줄어들 수 있을 것으로 전망된다.

### 참 고 문 헌

[1]. 진달복, "PIC16C84/71 마이크로컨트롤러", 양서각, 2000.  
 [2]. Microchip, "PIC16C7x Datasheet", Microchip, 1997  
 [3]. NEC(National Electric Code) : Article 210-Branch

Circuits 210-12, (1999 Edition)

[4]. W. Wang, S. Liu and J. E. Jones, "Flux cored arc welding : Arc signals processing and metal transfer characterization", Welding Journal, Vol. 74, No. 11, (1995), pp. 369-377  
 [5]. Underwriters Laboratories Inc. UL943 ISBN 1-55989-465-2 "Ground-Fault Circuit-Interrupters", September 27, 2002.  
 [6]. 전기저널 2002. 12. 2002 행정 자치부 화재 통계연보 2001 전기재해 통계분석(하)  
 [7]. NEC(National Electric Code), " Article 210-Branch Circuits 210-12", (2003 Edition)  
 [8]. Cullity, "Introduction to Magnetic Materials", Addison-Wesley, 1972.  
 [9]. Snelling, "Soft Ferrites : Properties and Applications", Butterworths, 1993.  
 [10]. B. Lax, "Microwave Ferrites and Ferromagnetic", McGraw-Hill Book Company, 1962

## 저 자 소 개



### 반 기 종(潘基宗)

1969년 10월 9일생. 1995년 호서대학교 제어계측공학과 졸업. 1998년 건국대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 현재 건국대학교 대학원 전기공학과 박사 과정재학. 2001년~현재 부천대학 전자과 겸임교수.

Tel : 02) 456-2585, Fax : 02) 444-8868

E-mail : sky@skylogo.org



### 김 낙 교(金洛教)

1949년 2월 4일생. 1973년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1977년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1985년 동대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1986-87 Oregon State Univ. 교환교수. 1996-97 Ohio State Univ. 교환교수. 1978-80한국

원자력 연구소 선임연구원. 1980-현재 건국대학교 전기공학과 교수

Tel : 02) 450-3485, Fax : 02) 447-9186

E-mail : lkkim@konkuk.ac.kr