

누전차단기가 설치된 옥내전로에서의 화재위험성  
Electrical fire hazards in the domestic circuit protected by  
Electric Leakage circuit Breaker(ELB)

홍성호\*, 김두현\*, 김상철\*\*, 김상렬\*\*\*

\*충북대학교 안전공학과, \*\*세명대학교 산업안전공학과,

\*\*\*안동과학대학 산업위생과

Abstract

This paper presents a study on the electrical fire hazards of leakage current in a distribution circuit simulating a domestic circuit for low voltage. In this simulated circuits, total charges and energy of leakage current are calculated by a theoretical approach and compared with the results obtained from experiments. The approach and results become a cornerstone for studying and analyzing causes of electrical fires.

1. 서론

전기재해 중에서도 전기화재는 전체 화재 중 34.2 [%](97년도)를 차지하고 있고 누전으로 인한 재해는 8.6 [%]를 차지하고 있다[1]. 이러한 누전으로부터 선로를 보호하기 위하여 누전차단기(Earth Leakage Breaker ; ELB)를 시설하는데 현재에는 누전뿐만 아니라 선로의 단락보호, 과부하보호겸용의 누전차단기가 보급되고 있다. 누전차단기는 전압동작형과 전류동작

형으로 구분되는데 현재에는 전류동작형이 주류를 이루고 있다. 누전차단기의 보급으로 인하여 누전으로 인한 재해를 상당히 감소시켰지만 여전히 누전으로 인한 화재는 계속 발생하고 있다. 따라서 본 연구에서는 전류동작형 누전차단기가 영상변류기에 흐르는 누설전류와 비교에 의해 정격감도전류가 정해지는 것에 착안하여 정격감도전류 이상과 미만을 통전시켰을 때 누전차단기의 동작여부, 동작전류의 크기 및 누설전류에 의한 에너지를 계산하였다. 그리고 이 에너지와 주위 가연성물질의 발화에너지와 비교를 통하여 화재위험성을 분석함으로써 누전으로 인한 화재를 규명하는데 도움을 주고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 누전차단기

누전차단기의 구성은 누설전류를 검출하기 위한 영상변류기, 검출된 전류와 감전 안전 한계에서 정해진 기준치를 비교하는 비교부, 그리고 비교부의 출력에 의해 전로를 차단하는 차단부로

되어 있다.

영상변류기는 2차권선이 감겨져 있는 철심의 자로와 부하전류가 통과할 수 있는 전로로 구성되며, 지락시의 사고로 인하여 관통하는 전로에 전류차가 발생하면 이에 상응하는 출력을 2차권선에 유기 시킨다. 비교부는 여러 가지 형이 있을 수 있으나 대부분은 영상변류기의 출력으로 동작되는 전자석과 이를 保持하려는 스프링으로 되어 있다. 또한 차단부는 전자석의 전자력이 스프링의 保持력을 능가하였을 때 동작하여 주 전로를 차단하는 기계적인 힘의 증폭부이다[2][3].

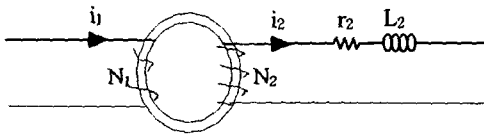


Fig. 1 Equivalent circuit of ELB

Fig. 1은 영상변류기와 전자석을 연결시킨 등가회로도이다. 1차전류인  $i_1$ 은 실제 영상변류기를 통해 흐르는 전류 즉 누설전류이고 구동향으로서 전원 주파수와 동일한 주파수의 정현파항과 과도적으로 존재하는 지수항의 합으로 표현된다. 이 누설전류가 정격감도전류 이상인 경우에 누전차단기는 선로를 차단하고 정격감도전류 미만인 경우는 누전차단기가 선로를 차단하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 이러한 특성을 고려하여 다음과 같이 두 가지 경우로 분리하여 화재위험성을 평가하였다.

Case I : 누전차단기가 선로를 차단하는 경우

Case II : 누전차단기가 선로를 차단하지 않는 경우

1) Case I

누전차단기가 동작하는 경우에 있어 전류는 차단기의 작동요구시간이 수초에서 몇십 ms로 짧아지고 이것은 상용전원의 수 싸이클 이내에서 동작하여야 함을 의미하므로 지수 함수적인 특성만 갖는다고 할 수 있다. 따라서 전류  $i_1$ 은 다음과 같이 정할 수 있다.

$$i_1 = I_{b1} e^{-t/\tau_1} [A] \quad (1)$$

$\tau_1$  : 1차전류 시정수

$I_{b1}$  : 1차전류 과도항의 과고치

누전차단기가 누전을 감지하기 시작하여 회로의 차단을 완료할 때까지의 1차권선을 통해 흐를 누전 전하량을 구하기 위하여 누전 차단기는 2차전류가 최대치로 되는 시각  $t_m$ 에 동작되도록 설계되었다고 보고 기계적 동작 지연 시간은 없다고 한다. 그러면 누전 전하량은 식(2)와 같다.

$$Q = \int_0^{t_m} i_1 dt \quad (2)$$

$t_m$  ; 누전차단기가 동작하기까지 시간  
식(8)에서 얻어진 전하량을 이용하여 누전에너지를 구할 수 있다.

2) Case II

누전차단기가 동작하지 못하는 경우에 있어 전류는 전원주파수와 동일한 주파수의 정현파항과 과도적으로 존재하는 지수항의 합으로 나타나므로 전류  $i_1$ 은 다음과 같이 정할 수 있다.

$$i_1 = I_{b1} e^{-t/\tau_1} + I_{m1} \sin \omega t [A] \quad (3)$$

$I_{m1}$  : 1차전류 최대치

따라서 누전전하량은

$$Q = \int_0^{t_f} i_1 dt \quad (4)$$

여기서  $t_f$ 는 누전차단기가 동작하지 않으면 무한대가 될 수 있겠지만 본 연구에서는 누설전하량에 의한 에너지가 가연성물질의 발화에너지에 도달하기까지의 시간으로 가정하였다.

이 Q를 이용하여 누전에너지를 구할 수 있다.

## 2.2 위험성 평가

### 1) Case I

누전차단기가 동작하는 경우에 있어 발생하는 누전에너지와 가연성 분진 및 가스의 최소발화에너지와 비교하여 화재위험성을 평가하였다. 최소발화에너지는 화염으로 전파하기 위해 시스템에 가해지는 최소의 양이고 공기 중에 가스 및 분진이 충분한 농도로 분포되어 있다면 극히 짧은 시간에 최소 발화에너지가 가해지면 화재 및 폭발의 위험성이 있다[4]. 따라서 누전차단기가 아주 짧은 시간에 동작하더라도 공기 중에 가스 및 분진이 충분한 농도로 분포되어 있다면 누전에너지에 의한 화재위험성은 충분히 존재한다.

### 2) Case II

누전차단기가 동작하지 않는 경우에 있어 누설전하량에 의해 발생하는 에너지는 상당히 큰 양이므로 고체의 최소발화에너지와 비교하여 화재위험성을 평가하였다.

## 3. 실험장치 및 방법

본 실험을 위하여 사용한 누전차단기는 전류동작형 電子式으로 정격동작전류는 30 [mA], 동작시간은 0.03 [sec], 지락보호, 과부하보호 및 단락보호겸용이다.

### 3.1 누설전류의 측정

Fig. 2와 같이 일반주택에서와 같은 조건을 구성하였다. 이때 누설전류의 양을 조절하기 위하여 0[Ω]~50[kΩ]의 가변저항을 부착하였고 이어서 누설전류가 흐른 양을 측정하기 위하여 누설전류측정기(Yokogawaele., AC1/10/100mA, Japan)를 사용하였다. 또 동작시간을 측정하기 위하여 누전차단기시험기(Musashi ele., AC 100/200V, AC 0~60/120/600/1200mA, 50/60Hz, Japan)를 사용하였다.

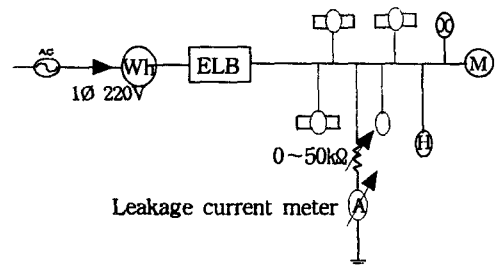


Fig. 2 Schematic diagram of a domestic distribution circuit with leakage current

### 3.2 발화에너지 추정

가연성 물질을 상온에서 열선에 접촉시켜 놓고 전류가 흐르게 한 다음 목재, 종이, 먼, 털실은 연기가 발생하면서 불꽃이 보이는 시점까지 시간을 측정하고 비닐, 플라스틱은 연기가 발생

하면서 용융되기 시작하는 시점까지 시간을 측정한다. 이때 사용한 열선의 저항은 약 12 [ $\Omega$ ]이고 길이는 50 [cm]이다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 누전차단기 동작전류

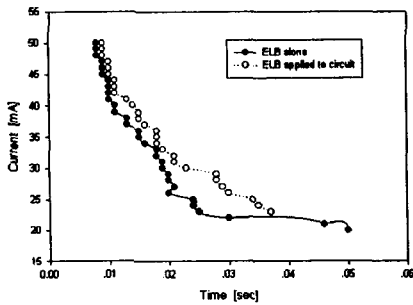


Fig. 3 Operative current of ELB alone and ELB applied to circuit

Fig. 3은 누전차단기 시험기로 측정된 누전차단기의 동작 전류와 모의 누전 회로에 부착한 누전차단기의 동작 전류에 대한 그림이다. 이와 같이 누전차단기는 한국산업규격에서 제시한 동작 시간 0.03 [sec]와 최소동작전류 30 [mA]에 정상 작동하였다[5].

##### 4.2 위험성 평가

###### 1) Case I

누전차단기가 0.03 [sec]내에 선로를 차단하는데 성공하더라도 그때까지 누설 전하량에 의한 에너지는 발생한다.

Table 1은 누전차단기가 동작했을 때 가연성 분진의 최소발화에너지에 도달하는 시간을 나타낸 것이다. 이 분진이 공기 중에서 발화한계 내에 분포되어

있다고 가정하면 누전이 발생했을 경우 누전차단기가 작동하더라도 분진들은 발화하고 나아가 폭발의 위험성이 있다. 또한 가연성 가스의 최소발화에너지는 분진보다 훨씬 작은 값을 갖는다.

Table 1. Time which energy of leakage current gets to MIE of flammable dusts [6]

가연성분진의 종류	시간[sec]	최소발화에너지[mJ]
Fructose	$2.0 \times 10^{-4}$	1
Stearin/Lead	$6.3 \times 10^{-4}$	3
Ferrocene	$1.1 \times 10^{-3}$	5
Methionine	$2.2 \times 10^{-3}$	9
Rubber(from grinding)	$3.6 \times 10^{-3}$	13
Milk sugar	$4.0 \times 10^{-3}$	14
Calcium stearate	$5.0 \times 10^{-3}$	16
Stearin/Calcium	$2.2 \times 10^{-2}$	25

Table 2는 가연성 가스의 최소발화에너지를 나타낸 것이다. 표에서 나타난 바와 같이 가스의 최소발화에너지는 매우 작아서 분진보다도 아주 작은 에너지만으로도 발화, 폭발의 위험성이 있다. 이러한 분진 중에 Propane이나 Butane은 LPG로 일반 주택에서도 많이 사용하는 가스이다. 따라서 가연성 가스의 누출이 발생하여 공기 중에 연

Table2. Time which energy of leakage current gets to MIE of flammable gases [7]

가연성가스의 종류	시간[sec]	최소발화에너지 [mJ]
Ethylene	$2.10 \times 10^{-6}$	$1.05 \times 10^{-2}$
Methane	$4.50 \times 10^{-6}$	$2.80 \times 10^{-2}$
Propane	$5.60 \times 10^{-6}$	$3.10 \times 10^{-2}$
N-Butane	$6.21 \times 10^{-6}$	$3.80 \times 10^{-2}$
Benzene	$1.11 \times 10^{-5}$	$5.50 \times 10^{-2}$
Acetone	$2.33 \times 10^{-4}$	1.15
Toluene	$5.20 \times 10^{-4}$	2.50
Acetnityl	$1.35 \times 10^{-3}$	6.00

소범위로 분포되어 있을 때 누전이 발생하면 즉시 화재 및 폭발의 위험성이 있다.

## 2) Case II

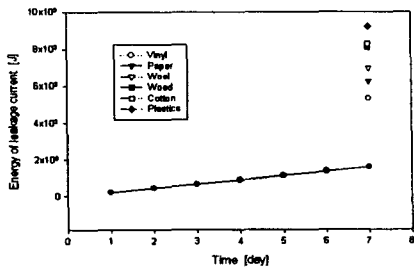


Fig. 4 Energy of leakage current Vs. MIE of combustibles( $I_l = 5$  mA)

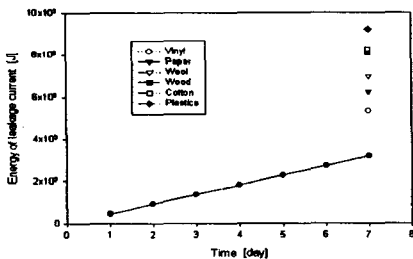


Fig. 5 Energy of leakage current Vs. MIE of combustibles( $I_l = 10$  mA)

그림 4, 5, 6, 7은 누설전류가 각각 5, 10, 15, 20 [mA]일 때 7 [day]동안 발생하는 누전에너지와 실험을 통하여 구한 일반 가연성물질의 최소발화에너지와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 누설전류가 15 [mA]이상일 경우 에너지가 발생하는 시간이 7 [day]정도 되었을 때 비닐의 최소발화에너지에 도달하게 된다. 그리고 20 [mA]의 전류가 누설되는 경우에는 7 [day]정도 누전에너지가 발생되었

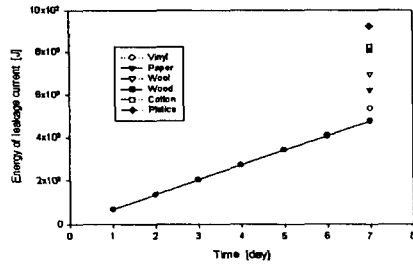


Fig. 6 Energy of leakage current Vs. MIE of combustibles( $I_l = 15$  mA)

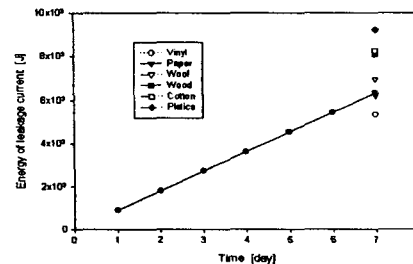


Fig. 7 Energy of leakage current Vs. MIE of combustibles( $I_l = 20$  mA)

을 경우 비닐, 종이, 목재의 최소발화에너지이상 발생한다. 따라서 누전차단기가 동작하지 못하는 전류인 15~20[mA]는 주위 조건이 열에너지를 축적하기 적합한 상태에서 7 [day]동안 누전에너지가 발생되면 화재가능성이 존재한다.

## 5. 결론

본 논문은 실제 일반 가정의 전기설비를 고려한 회로에서 발생할 수 있는 누전현상을 모의한 회로를 구성하고 그때의 발생전하량 및 에너지의 이론치와 누전실험을 통하여 얻어진 값을 비교한 연구이다. 누전에 의한 에너지의 위험성을 가연성 물질의 최소발화

에너지와 비교, 평가한 결과 본 실험 조건하에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 누전차단기의 동작시간은 0.03 [sec] 이내이고 최소동작전류는 23 [mA]이었다.

2. 선로에 동작시간 0.03 [sec], 정격감도전류 30 [mA]인 누전차단기에 있어 정격감도전류 이상 통전되어 누전차단기가 동작하더라도 누전점에서 발생하는 누전에너지는 가연성 분진 및 가스의 최소발화에너지이상의 수치였다.

3. 선로에 누설되는 전류가 23 [mA]미만이면 누전차단기는 동작하지 않았다. 이때 누설전류가 15 [mA]이상이 되면 누전점에서 누전에너지가 약 7 [day]동안 발생되었을 때 일반 가연성물질의 최소발화에너지에 도달하였다.

이상과 같은 결과에서 누전차단기의 정격감도전류 미만의 통전시에는 화재 가능성이 존재함을 알 수 있었다. 따라서 본 연구는 선로에서 누전 발생 시 누전에 의한 화재의 원인분석에 좋은 자료가 될 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

- [1] 한국전기안전공사, “전기재해통계 분석”, 1998
- [2] 竹俗是辛, “漏電しや斷機の基礎と實務知識”, p.62, 오ム社, 1974
- [3] 김은배, “누전차단기의 최적활용을 위한 보호특성”, p.7~9, 성균관대학교

박사학위논문, 1987

[4] Roger A. Strehlow, “Combustion Fundamentals” ,p.381~384,McGraw-Hill, 1984

[5] 한국산업규격(KS C 4613), 한국표준협회, 1994

[6]Rolf K. Eckhoff, “Dust Explosions in the Process Industries” , p. 563 ~ 581, Butterworth Heinemann, 1991

[7] Wilfred E. Baker & Ming Jun Tang, “Gas, dust and hybrid explosions” , p.56~60, Elsevier, 1991