

# 누전차단기로 보호되는 저압선로에서의 발화위험성

홍성호<sup>†</sup> · 김두현

충북대학교 안전공학과  
(1999. 12. 8. 접수 / 2000. 3. 7. 채택)

## Electric Fire Hazard in Low Voltage Distribution Circuits Protected by Electric Leakage Circuit Breaker(ELB)

Sung-Ho Hong<sup>†</sup> · Doo-Hyun Kim

Department of Safety Engineering, Chungbuk National University  
(Received December 8, 1999 / Accepted March 7, 2000)

**Abstract :** This paper presents a study on the assessment of electrical fire hazards by electric circuits with leakage. The hazards are evaluated with the energy supplied by earth-leakage currents which flow in the circuits simulating the actual circuit of domestic premises. Also, operating time and current of ELB are measured by an experimental approach. A common specification of ELB used in this paper has a sensitivity of 30[mA] for leakage current working on the current-balance principle. Total charges and energy of leakage currents are calculated quantitatively by a theoretical approach and compared with the results obtained from experiments.

### 1. 서 론

누전차단기는 서독에서 최초로 보호방식이 발표된 이래 여러 방식 중에서 전류동작형 누전차단방식이 가장 적절한 것으로 인정됨으로써 급속히 보급되어 1965년에는 30 [mA]감도의 누전차단기가 실용화되었다<sup>1)</sup>.

누전차단기의 기본원리는 누전(지락)을 검출하고 이를 입력신호로 하여 전로를 차단하는 것이며, 전압동작형과 전류동작형으로 구분된다. 전류동작형은 지락전류를 영상변류기로 검출하여 동작하는 것이므로 전압동작형에서와 같은 절연저항의 확보문제가 없기 때문에 현재는 전류동작형이 주류를 이루고 있는 실정으로서 저압용에까지 설치되어 있다.

이러한 전류동작형 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 계산하여 발화위험성을 평가하였다. 이러한 위험성 평가를 위하여 일반주택, 아파트 등에서 사용하는 저압용 전류동작형 전자식 지락보호 과부하보호 및 단락보호 겸용인 누전차단기를 일반가정의 저압회로와 유사한 모의회로에 설치하였다. 그리고 누전차단기가 동작하는 경우-정격감도전류 이상의 전류가 흐를 경우와 누전차단기가 동작하지 않는 경우-정격감도전류 미만의 전류가 흐를 경우로 분리하여 각각의 경우에 있어서의 누설전하량에 의하여 발생하는 에너지를 계산하였다. 그리고 이 에너지와 주위 가연성물질의 최소발화에너지와 비교를 통하여 발화위험성을 분석함으로써 누전으로 인한 화재를 규명하는데 도움을 주고자 하였다.

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
sungho77@trut.chungbuk.ac.kr

## 2. 이론적 고찰

### 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.

누전차단기의 핵심부는 영상변류기(Zero-phase Current Transformer : ZCT)이다. 영상변류기는 2차권선이 감겨져 있는 철심의 자로와 부하전류가 통과할 수 있는 전로로 구성되며, 지락시의 사고로 인하여 관통하는 전로에 전류차가 발생하면 이에 상응하는 출력을 2차권선에 유기시킨다.

비교부는 여러 가지 형이 있을 수 있으나 대부분은 영상변류기의 출력으로 동작되는 전자석과 이를 유지하려는 스프링으로 되어 있다. 또한 차단부는 전자석의 전자력이 스프링의 유지력을 능가하였을 때 동작하여 주 전로를 차단하는 기계적인 힘의 증폭부이다<sup>2,6)</sup>.

그림 1은 영상변류기와 전자석을 연결시킨 등가회로도이다. 1차권선에 흐르는 전류  $i_1$ 은 실제 영상변류기를 통해 흐르는 전류, 즉 누설전류이다. 이 누설전류가 정격감도전류 이상인 경우에 누전차단기는 전로를 차단하고 정격감도전류 미만인 경우는 누전차단기가 전로를 차단하지 않는다. 누전차단기가 전로를 차단해도 누전점에서는 누설전류에 의한 누전에너지는 발생한다. 따라서 이 누전에너지에 의한 발화위험성이 존재한다. 또한 누전차단기가 전로를 차단하지 못하는 경우에 있어 누전에너지는 계속 발생되므로 발화가능성이 존재한다.

본 연구에서는 이러한 특성을 고려하여 다음과 같이 두 가지 경우로 분리하여 발화위험성을 평가하였다.

- Case I : 정격감도전류 이상 통전 시  
- 누전차단기가 전로를 차단하는 경우

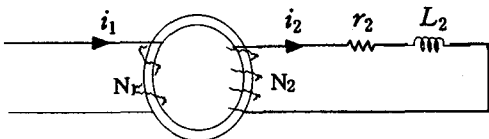


Fig. 1. Equivalent circuit of ELB

- Case II : 정격감도전류 미만 통전 시  
- 누전차단기가 전로를 차단하지 않는 경우

#### (1) Case I

누전차단기가 동작하는 경우에 있어 전류는 차단기의 작동요구시간이 수초에서 수십 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.

$$i_1 = I_{p1} e^{-t/\tau_1} [A] \quad (1)$$

여기에서

$I_{p1}$  ; 1차전류 과도항의 파고치

$\tau_1$  ; 1차전류 시정수

누설 전하량은 식 (2)와 같다.

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

여기에서  $t_m$  ; 누전차단기가 동작하기까지 시간

식(2)에서 얻어진 전하량을 이용하여 누전에너지를 구하면 다음과 같다.

$$W = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot V \quad (3)$$

#### (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.

$$i_1 = I_{p1} e^{-t/\tau_1} + I_{m1} \sin \omega t [A] \quad (4)$$

여기에서

$I_{m1}$  ; 1차전류 최대치(정상상태)

따라서 누설전하량은 식 (5)와 같다.

$$Q = \int_0^{t_f} i_1 dt \quad (5)$$

여기에서  $t_f$ 는 누전차단기가 동작하지 않으면 무한대가 될 수 있겠지만 본 연구에서는 누설전

하중에 의한 에너지가 가연성물질의 발화에너지에 도달하기까지의 시간으로 가정하였다.

누전에너지는 Case I 과 같은 방법으로 식(3)에서 구할 수 있다.

### 2.2. 발화위험성

본 연구에서는 전 절에서 구한 누전에너지가 가연성 물질의 최소발화에너지에 도달하는 시간을 계산하고 이때 발화가 시작되어 전체화재로 진행할 수 있다고 가정하고 가연성 물질의 최소 발화에너지에 도달하는 시간까지만 고려하여 누전에너지를 구하였다. 따라서 발생한 누전에너지가 가연성 물질의 최소발화에너지에 도달하는 시간을 계산하여 발화위험성을 평가할 수 있다.

#### (1) Case I

누전차단기가 동작하는 경우에 있어 발생하는 누전에너지는 가스와 분진의 최소발화에너지와 비교하여 발화위험성을 판단하였다.

#### (2) Case II

누전차단기가 동작하지 않는 경우에 있어 발생하는 누전에너지는 누전점에서 상당히 큰 양이 축적되므로 고체의 최소발화에너지와 비교하여 위험성을 평가하였다. 고체의 최소발화에너지는 일반 가연성 물질(목재, 종이, 천, ... 등)의 최소발화에너지를 고려하였다. 또한 누전차단기가 동작하지 않는 전류의 기준을 5, 10, 15, 20[mA]로 정하였다. 따라서 누설전류와 누전에너지의 계산, 그리고 발화위험성을 평가할 때 이 전류값을 이용하였다.

## 3. 실험장치 및 방법

본 실험을 위하여 사용한 누전차단기는 전류 동작형으로 정격동작전류는 30[mA], 정격부동작전류는 15[mA], 동작시간은 0.03 [sec], 지락보호, 과부하보호 및 단락보호겸용이다. 또한 시중에서 유통되는 3개사의 제품으로 실험하였는 바 편의상 A, B, C제품으로 하였다.

### 3.1. 누전차단기 동작시간 측정

누전차단기의 최소동작전류와 차단동작유무, 동작시간을 측정하기 위한 회로도에는 그림 2와

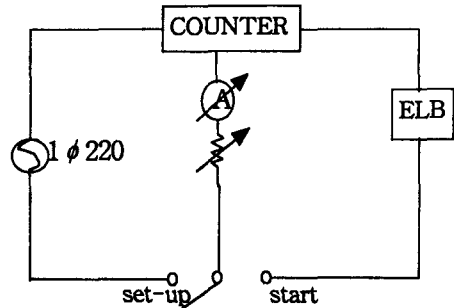


Fig. 2. Measurement circuit ELB operating time

같다. 이때 사용한 실험장치는 누전차단기시험기(Musashi elec., AC 100/200V, AC 0~60/120/600/1200mA, 50/60Hz, Japan)이다. 그림과 같이 회로를 구성한 다음 전류를 50 [mA]에서부터 1 [mA]씩 감소시킬 때 동작시간을 측정하였다.

일반적으로 차단기는 자체의 내부고장으로 인하여 오동작하는 경우가 종종 발생한다[7]. 본 연구에서는 이와 같이 누전차단기의 동작시간을 측정함과 동시에 정상작동을 시험하였다. 그리고 정상작동하는 누전차단기를 누전을 모의한 회로에 설치하였다.

### 3.2. 누전을 모의한 회로에서 누설전류의 측정

적산 전력계, 형광등, 백열등, 전기 청소기, 전열기, 선풍기를 연결하여 일반주택에서와 같은 조건을 구성하였다. 그리고 임의로 누전회로를 구성하여 누설전류가 흐르도록 하였다. 또 누설전류의 크기를 조절하기 위하여 0[Ω] ~ 50[kΩ]의 가변저항을 부착하였고 여기에 누설전류가 흐른 양을 측정하기 위하여 누설전류측정기(Yokogawa elec., AC 1/10/100mA, Japan)를 연결하였다.

그림 4는 실험장치에 대한 개략도이다.

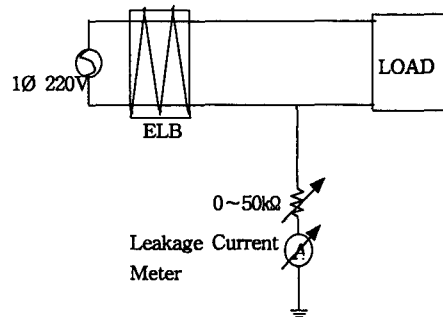


Fig. 3. Schematic diagram of a low voltage circuit with leakage current

**(1) Case I**

그림 4의 회로에서 가변저항을 조절하여 누설 전류를 50 [mA]에서부터 1 [mA]씩 감소시켜 가면서 누전차단기가 동작할 때까지 통전시켰다. 이때 누전차단기가 동작하는 전류값을 측정하고 누전차단기 시험기로 측정된 전류값과 비교하였다. 또한 누전차단기가 동작한 순간의 누전회로 R과 C를 측정하여  $\tau_1$ 을 구하였다. 여기서 R과 C를 측정하는데 사용한 기기는 RCL Meter(Fluke elec., 100kHz~1MHz, AC & DC Test Mode 50mV~2V, USA)이다.

여기에서 측정된 전류는 정상상태의 전류이므로 영상변류기 1차측에 흐르는 전류를 알기 위해서는 과도전류의 최대치인  $I_{b1}$ 을 구해야 한다.

본 연구에서는 과도전류의 최대치인  $I_{b1}$ 을 구하기 위해 따로 개폐기, 전류계, 전기기기로 회로를 구성한 후 개폐기를 개폐시키면서 전류계를 실측하였다.

그림 4는 정상상태에서 전류가 흐를 때 나타나는 과도전류의 최대치에 대한 그림이다. 그림에서 점으로 나타난 부분은 실험으로 측정된 수치이고 실선으로 나타난 부분은 curve fitting이다. 이 곡선에 대한 식은 식(6)과 같이 나타난다. 이 식을 이용하여 과도전류의 최대치인  $I_{b1}$ 을 추정하여 이 값을 식 (1) 및 (4)에 대입하여 1차 전류  $i_1$ 을 구하였다.

$$I_{b1} = 0.12I^3 - 0.44I^2 + 2.41I \quad (13)$$

여기에서

$I$  ; 정상상태 전류 [A]

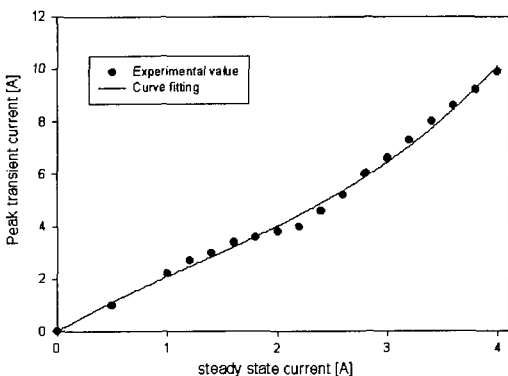


Fig. 4. Curve fitting for the relation between steady state current and peak transient current

**(2) Case II**

Case I과 동일한 방법으로 그림 3의 회로에서 가변저항을 조절하여 누설전류가 5, 10, 15, 20 [mA]가 흐르도록 하였다. 그리고 누전차단기가 동작하는지를 관측하였다. 또한 5, 10, 15, 20 [mA] 각각의 경우에 대해 누전회로의 R과 C를 측정하여  $\tau_1$ 을 구하였다.

누전에너지 W와 비교, 평가를 위한 가연성 물질의 최소발화에너지를 측정하는 방법은 다음과 같다.

**(3) 가연물의 최소발화에너지 측정**

본 연구에서는 일반 주택을 모델링하였는 바, 고체 가연성 물질은 일반 가연성 물질을 고려하였다. 일반 가연성 물질의 종류는 일반 가정에서 많이 사용되는 물질로써 목재, 종이, 면, 털실, 비닐, 플라스틱을 선택하였다. 그림 5는 최소발화에너지 측정을 위한 실험장치의 개략도이다.

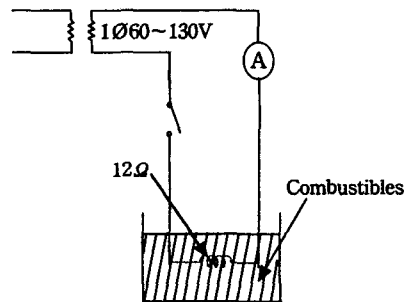


Fig. 5. Measurement circuit minimum ignition energy of combustibles

**4. 결과 및 고찰**

**4.1. 누전차단기 동작시간**

그림 6은 각 회사별로 누설전류의 크기에 따른 누전차단기의 동작시간을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯 약간의 차이는 있지만 감도전류 20 ~ 25 [mA], 동작시간은 0.01 ~ 0.03 [sec]에서 동작함으로써 모든 누전차단기가 한국공업규격<sup>[8]</sup>에서 제시하고 있는 동작시간 0.03 [sec], 정격 감도전류 30 [mA]의 수치보다 빠른 시간과 낮은 전류에서 동작하였다.

**4.2. 누전을 모의한 회로에서 누설전류**

**(1) Case I**

누전차단기가 동작하는 경우에 있어  $Im_1$ 은 약

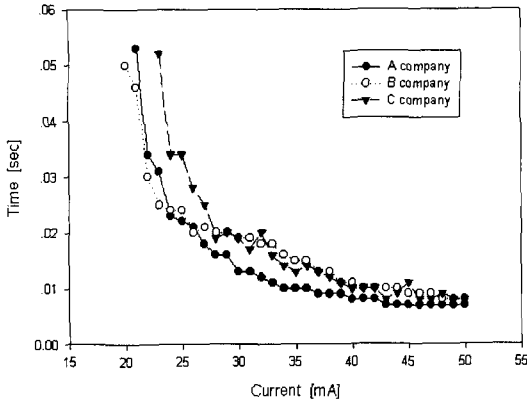


Fig. 6. Variation of ELB operating time over leakage current

32.53 [mA]로 측정되었다.

① 누전차단기 동작전류

누전차단기의 정격감도전류 이상 통전하는 것은 누전차단기가 누전이 발생하였을 때 선로의 차단에 성공한다는 의미이다. 따라서 가변저항을 조절하여 통전시켰을 때 누전차단기는 23 [mA] 이상에서 동작하였다. 그림 7은 누전차단기 시험기로 측정된 누전차단기의 동작 전류와 누전을 모의한 회로에 부착한 누전차단기의 동작 전류에 대한 그림이다.

그림에서 보듯 누전을 모의한 회로에 부착한 누전차단기가 누전차단기시험기로 측정된 전류값보다 약 2 ~ 3 [mA]정도 큰 전류에서 동작하였다. 이와 같이 누전차단기는 한국공업규격에서 제시한 동작시간 0.03 [sec]와 최소동작전류 30 [mA]에 정상 작동하였다.

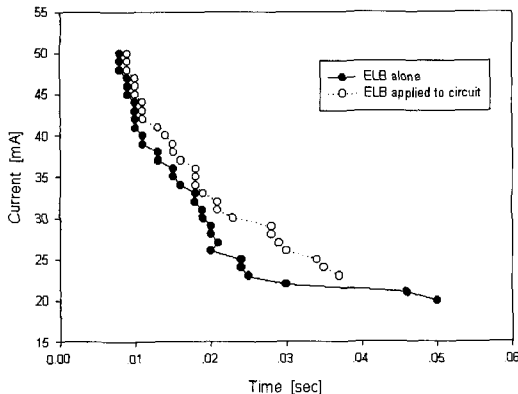


Fig. 7. ELB operating current measured by ELB tester

② 발화위험성

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

표 1은 누전차단기가 동작했을 때 가연성 분진의 최소발화에너지에 도달하는 시간을 나타낸 것이다. 표 1에 나타낸 분진의 최소발화에너지는 압축공기로 분진을 부유시킨 상태에서 전기 스파크에너지로 발화시켜 이 에너지를 측정할 수 있다<sup>9)</sup>.

표에서 보듯 가연성 분진이 공기 중에 최소폭발농도로 부유하고 있을 때 누전이 발생하면 누전차단기가 0.03[sec]에 동작한다 하더라도 누전점에 축적되는 누전에너지는 가연성 분진의 최소발화에너지보다 높기 때문에 비록 선로에 누전차단기가 존재하더라도 분진은 발화하고 나아가 폭발의 위험성이 존재한다.

표 2는 누전차단기가 동작했을 때 가연성 가스의 최소발화에너지에 도달하는 시간을 나타낸 것이다. 표에 나타난 바와 같이 가스의 최소발화에너지는 매우 작아서 분진보다도 더 작은 에너지만으로도 발화, 폭발의 위험성이 있다. 표 2의 가스 중에 propane이나 butane은 LPG의 구성성분으로 일반 주택에서도 많이 사용하는 가스이다. 따라서 가연성 가스의 누출이 발생하여 공기 중에 연소범위로 분포되어 있을 때 누전이 발생

Table 1. Time needed that the energy of leakage current goes up to MIE of flammable dusts[9]

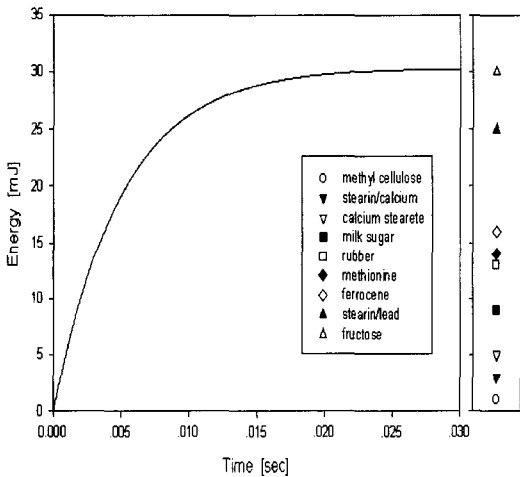
flammable dust	weight% <size[μm]			Cmin [g/ m <sup>3</sup> ]	MIE [mJ]	computed time[sec]
	71	32	20			
fructose (fromfilter)	17			60	1	1.68 × 10 <sup>-4</sup>
stearin/lead	99	95	75	60	3	5.21 × 10 <sup>-4</sup>
ferrocene	33			15	5	9.01 × 10 <sup>-4</sup>
methionine	100	99	95	30	9	1.76 × 10 <sup>-3</sup>
rubber (fromgrinding)	43	12		30	13	2.80 × 10 <sup>-3</sup>
milk sugar	99	92	77	60	14	3.10 × 10 <sup>-3</sup>
calciums tearate		92	80	30	16	3.72 × 10 <sup>-3</sup>
stearin/calcium	100	89	64	30	25	8.71 × 10 <sup>-3</sup>
methy cellulose	93	37	12	30	30	2.29 × 10 <sup>-2</sup>

\* MIE : Minimum Ignition Energy(최소발화에너지)

**Table 2.** Time needed that the energy of leakage current goes up to MIE of flammable gases[10]

flammable gas	MIE [mJ]	computed time[sec]
ethylene	0.096	$1.60 \times 10^{-5}$
methane	0.28	$4.64 \times 10^{-5}$
propane	0.31	$5.14 \times 10^{-5}$
n-butane	0.38	$6.31 \times 10^{-5}$
benzene	0.55	$9.16 \times 10^{-5}$
acetone	1.15	$1.94 \times 10^{-4}$
toluene	2.50	$4.31 \times 10^{-4}$
acetonitril	6.00	$1.11 \times 10^{-3}$

\* MIE : Minimum Ignition Energy(최소발화에너지)

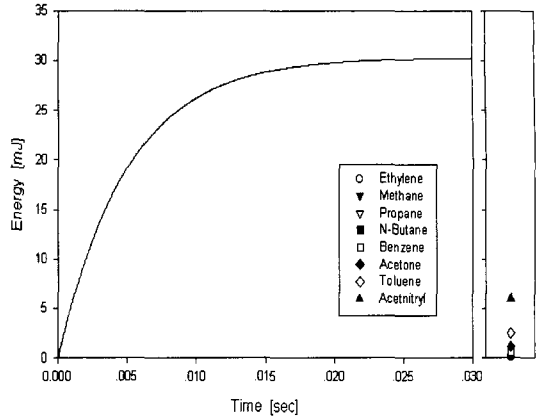


**Fig. 8.** Energy of leakage current vs. MIE of flammable dusts

하면 화재 및 폭발의 위험성이 존재한다.

그림 8은 누전에너지와 가연성 분진의 최소발화에너지에 도달하는 시간과의 관계를 나타낸 것이다.

그림 9는 누전에너지가 가연성 가스의 최소발화에너지에 도달하는 시간과의 관계를 나타낸 것이다. 가연성 가스의 최소발화에너지는 보통  $10^{-5} \sim 10^{-3}$  [J]정도이다. 따라서 그림에서 보는 바와 같이 가연성 가스의 최소발화에너지는 누전에너지보다도 훨씬 작기 때문에 이러한 가스가 공기 중에 연소범위농도로 분포되어 있을 때 누전이 발생하면 발생에너지 측면에서 볼 때 누전 차단기가 동작하더라도 발화위험성이 존재한다.



**Fig. 9.** Energy of leakage current vs. MIE of flammable gases

**(2) Case II**

누전현상을 모의한 회로에서 누전차단기를 ON시켜놓은 상태로 5, 10, 15, 20 [mA]가 통전되었을 때 누전차단기는 동작하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 이 전류값은 전원이 공급되는 한 무한대로 흐를 것이라고 보고 발화위험성을 평가하였다.

① 발화에너지

표 3은 실험을 통하여 구한 일반 가연성 물질의 최소발화에너지이다.

② 발화위험성

그림 10은 누설전류가 각각 5, 10, 15, 20 [mA] 일 때 발생하는 누전에너지와 가연성 물질의 최소발화에너지와의 관계를 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 누설전류가 커질수록 발생하는 에너지는 짧은 시간에 가연성 물질의 최소발화에너지에 도달하는 것을 알 수 있다.

**Table 3.** Minimum ignition energy of combustibles

combustible	minimum ignition energy [J]
vinyl	5339.9
paper	6223.0
wool	6963.5
wood(chips of lauan)	8083.7
cotton	8264.1
plastics	9226.7

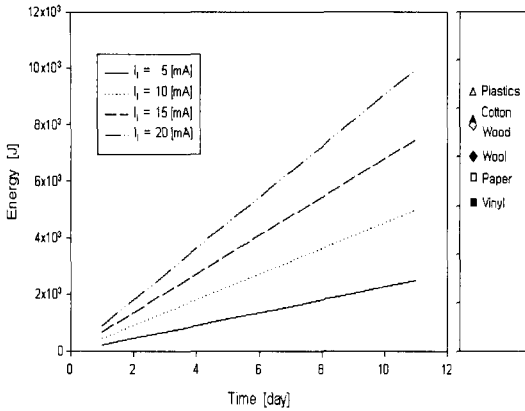


그림 10. Energy of leakage current vs. MIE of combustibles

### 5. 결론

본 논문은 실제 일반 가정의 전기설비의 회로에서 발생할 수 있는 누전현상에 대하여 회로를 구성하고 그때의 발생전하량 및 에너지의 이론치와 누전실험을 통하여 얻어진 값을 비교한 연구이다. 누전에 의한 에너지의 발화위험성을 가연성 물질의 최소발화에너지와 비교, 평가한 결과 본 실험 조건하에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 누전차단기가 동작하는 경우에 있어서의 누설전류를 지수함수로 제안하였고, 누전차단기가 동작하지 않는 경우의 누설전류는 정현파항과 지수항의 합으로 표현할 수 있음을 확인하였다. 이를 이용하여 누전점에서 발생하는 누전에너지를 계산하여 단열조건일 때 이 에너지가 실험을 통하여 구한 주위 가연성물질의 최소발화에너지에 도달하는 시간을 계산하여 비교한 결과 발화위험성이 존재하였다.
2. 선로에 동작시간 0.03 [sec], 정격감도전류 30 [mA]인 누전차단기에 있어 정격감도전류 이상 통전되어 누전차단기가 동작하더라도 누전점에서 발생하는 누전에너지는 가연성 분진 및 가스의 최소발화에너지의

수치 이상이었다.

3. 단열을 가정하였을 때 누설전류가 5 [mA], 10 [mA], 15 [mA], 20 [mA]일 경우 누전점에서 누전에너지가 각각 42 [days], 21 [days], 14 [days], 11 [days] 동안 발생되면 플라스틱의 최소발화에너지에 도달하였다.
4. 누전현상을 모의한 회로에 부착한 누전차단기의 동작전류는 누전차단기 단체시험으로 측정된 동작전류보다 2 ~ 3 [mA]정도 높게 나타났다.
5. 측정된 누전차단기의 동작시간은 0.01 ~ 0.03 [sec]이었고 계산된 이론적 동작시간은 0.013 [sec]로써 측정값이 더 느린 동작시간을 나타냈다.

### 참고문헌

- 1) 고태윤, 누전차단기 원리해설, 전광산업사, pp. 9~38, 1978.
- 2) 김은배, 누전차단기의 최적활용을 위한 보호특성, 성균관대학교 대학원 박사학위논문, pp. 1~9, 1987.
- 3) 국립노동과학연구소, 누전차단기의 사용안전, 국립노동과학연구소, pp. 20~26, 1987.
- 4) 김두현 외 5인, 전기안전공학, 동화기술, pp. 122~124, 1995.
- 5) 설승기, 박민호, 누전차단기의 설계와 제작, 대한전기학회지, Vol. 29, pp. 303~311, 1980.
- 6) F. W. Cooper, Electrical safety engineering, 3rd ed. Butterworth Heinemann, pp. 113~144, 1993.
- 7) N. T. Stringer and D. Waser, An innovative method of proving total breaker failure protection, IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 32, pp. 1011~1016, 1996.
- 8) 한국공업규격(KS C 4613), 한국표준협회, 1994.
- 9) R. K. Eckhoff, Dust explosions in the process industries, Butterworth Heinemann, pp. 563~581, 1991.
- 10) 정국삼, 김홍, 화학안전공학, 신광문화사, p. 37, 1997.