

# 220 V 직렬 아크고장발생 시 점화 시간/전류 특성 및 에너지 분석

## Analysis of Ignition Time/Current Characteristics and Energy when Series Arc-Fault Occurs at Rated 220 V

고 원 식\* · 문 원 식\* · 방 선 배\*\* · 김 재 철†  
(Won-Sik Ko · Won-Sik Moon · Sun-Bae Bang · Jae-Chul Kim)

**Abstract** - Probability of ignition due to arc-fault and energy of the arc-fault for the case of applying serial arc-fault interruption time of 120 V defined in UL 1699 to the voltage of 220 V of domestic condition and also for the case of applying it to the HIV wire type are analyzed. It has been confirmed that when the arc-fault occurs under 5 A, 10 A, and 20 A. Probability of ignition for the three different current conditions is 0.74(74%), 0.48(48%), and 0.32(32%) respectively for respective interruption time within 1 sec, 0.4 sec, and 0.2 sec. We discover that when we apply the same arc interruption time for 120 V defined in UL 1699 to the domestic environment of 220 V. The probability of ignition increases from 1.5% for 120 V condition to as much as 74% for 220 V condition. Conclusively, if we apply the standard for the serial arc-fault interruption time defined in UL 1699 for 120 V to the domestic condition of 220 V, the fire prevention effect of electric fire due to arc-fault equal to that of UL standard of 120 V can not be achieved.

**Key Words** : Arc-fault, Series arc, AFCI, Ignition time/current, Arc energy

### 1. 서 론

1887년 국내에 전기가 처음 들어온 이후 오늘날까지 산업의 발달과 함께 주거문화의 변화로 전력수요는 날로 증가하여 2011년 1년간 전력사용량이 455,070백만 kWh에 이르고 있으며, 전기화재 또한 지속적으로 발생하고 있다. 2011년 전기화재통계에 의하면 전기화재의 경우 전체 화재 43,875건 중 9,351 건으로 21.3%를 점유하고, 이들 전기화재를 원인별로 분석해보면 절연열화에 의한 단락 2,287 건(24.5%), 미확인 단락 2,245 건(24%), 접촉 불량 722 건(7.7%), 트래킹에 의한 단락 668 건(7.1%) 등 아크에 의한 전기화재가 6,844 건으로 73.2%를 차지하고 있다[1]. 이와 같이 전기화재의 대부분이 아크에 의해 발생하고 있으나 현재 국내의 경우 전기화재를 예방하기 위하여 주택용 보호기기로 배선용차단기와 누전차단기를 사용하고 있다. 그러나 이들 차단기는 특성상 과부하나 누전으로 인한 전기화재는 부분적으로 보호할 수 있으나 앞에서 언급한 아크로 인해 발화되는 전기화재는 보호할 수 없다[2-3].

미국의 경우 1994년부터 1998년까지 발생한 전기화재건수 73,500여 건을 분석한 결과 약 83%인 60,900여 건이 아크발

생으로 인하여 발화된 화재로 분석 보고되었다[3-4]. 특히, 주택의 경우 약 40%가 아크로 인하여 발생한 것으로 보고 되어 2002년부터 주택의 거실과 침실에 아크차단기(AFCI: Arc Fault Circuit Interrupter)를 도입하였다. 그 결과, 침실 및 거실에서 발생한 전기화재점유율이 2002년 23.6%에서 2004년 14.9%로 감소하였다. 이에 따라 2008년 12월 1일부터는 주택의 경우 물기나 습기가 많은 부엌과 욕실, 지하실을 제외한 주택의 모든 회로에 아크차단기를 설치하도록 하였다[3][5]. 향후 2015년부터는 제습기를 비롯한 냉장고, 세탁기 등 모든 생활가전제품에 연차적으로 아크차단기 설치를 의무화할 예정이다. 또한, 국제표준규격인 IEC에서도 주택의 전기화재예방을 위하여 아크검출장치(AFDD: Arc Fault Detection Device)의 도입을 검토하고 있다.

이렇듯 전기화재예방을 위하여 아크발생에 대한 감지 및 차단이 필요성이 인정되어 국제표준규격에서도 도입하기로 결정함에 따라 국내에서도 한국 산업규격이나 전기설비기술기준에 도입을 검토하고 있다. 국내·외 아크차단기 개발제품은 미국의 GE와 Eaton, 독일의 Siemens, 프랑스의 Schneider 등이 대표적인 제조사이며 세계에서 유일한 미국의 UL 시험규격에 의하여 인증을 받아 북미지역을 대상으로 유통되고 있다[6]. 우리나라에서도 10여 년 전부터 연구개발이 시작되었으며 최근에 일부 중소기업에서 아크차단기, 아크경보기, 아크검출장치 등이 개발을 완료하여 사찰 등에 일부 설치하고 있다. 이와 같이 국내에서도 아크관련기술에 많은 관심이 집중되고 있으나 국내환경에 적합한 아크관련 시험방법 및 시험기준이 마련되지 않아 혼란스러운 상황으로서 이에 대한 신뢰성 확보가 시급하다[7-11].

UL 1699 표준은 미국의 120 V 표준 전압을 기준으로 제

\* School of Electrical Engineering, Soongsil University, Korea

\*\* Korea Electrical Safety Corporation Research Institute

† Corresponding Author : School of Electrical Engineering, Soongsil University, Korea

E-mail : jckim@ssu.ac.kr

Received : July 23, 2013; Accepted : July 26, 2013

시하였기 때문에 220 V 전압과 HIV 전선을 사용하는 국내에 적용하기에는 적절하지가 않다[6][12-13]. 따라서 본 논문에서는 전기화재를 예방하기위한 아크고장 차단시간 기준을 제시하고자 아크고장으로 인한 점화 확률과 아크고장에너지를 분석하였다. 또한, 아크고장에는 여러 종류가 있으나 전기화재의 직접적인 원인이 되는 직렬 아크고장을 중심으로 분석하였다[3].

## 2. 본 론

### 2.1 아크의 종류 및 특성

아크란 아크방전의 약어이며 두 전극사이에 공기의 절연 파괴로 전극전단은 1,000-1,500 °C로 가열되어 소손을 동반한 강한 백색 빛을 발하면서 방전되는 현상을 아크방전이라고 정의하고 있다. 아크는 발생 순간부터 일정 시간에 이르기까지 다양한 특징이 일어나며 통전 전류의 크기와 지속시간이 점화시간의 기준이 되며 화재의 주요 원인이 된다. 또한 아주 작은 전류라 하여도 1,000 °C 이상의 온도발생이 가능하다. 따라서 일반 비닐절연전선의 경우 절연체의 발화점은 250-600 °C로서 아크가 직접적인 화재의 원인이 된다[3][7-11].

아크의 종류는 스위치 On-Off 시 플러그를 콘센트에 꽂을 때나 뽑을 때, 또는 가전제품 등 전기기기 기동 시에 발생하는 정상적인 아크와 사고를 동반하는 직렬아크, 병렬아크, 접지아크 등 사고아크로 분류한다. 직렬아크는 전기배선 및 배선기구의 접속부분에서 주로 접속불량과 단선, 반 단선 등과 접속불량 부분에서 발생하는 고온으로 인하여 산화층이 생성되어 이산화탄소의 저항특성으로 절연체가 탄화되어 유해(사고)아크가 발생하는 것이다[7-11].

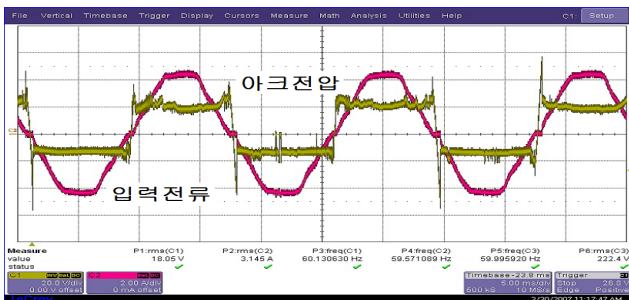


그림 1 저항부하일 때의 아크고장 전압·전류 특성 (20 V/div, 2 A/div.)

Fig. 1 Characteristics of arc-fault voltage/current with resistive loads

그림 1은 전형적인 직렬 아크고장 전압·전류 파형이며, 직렬로 저항 부하를 연결하고 UL 1699의 표준에 의한 탄화경로 아크시험에 의해 아크고장을 발생시켰을 경우 나타나는 전압·전류 파형이다. 아크 전압의 주기는 부하전류와 동일한 주기로 발생되며 부하전류의 크기, 아크 발생조건 등에 따라 변화한다. 직렬 아크 고장 전류는 부하임피던스와 아크 임피던스가 더해진 상태에서 흐르는 전류로 결정되고 그 크기가 정상적인 부하전류와 비슷하거나 작으며, 아크 전

압의 극성이 변화되는 순간, 즉 영점에서 아크 고장전류가 소멸되었다가 다시 나타나는 shoulder (extinction and re-ignition) 현상이 발생하는 특성을 갖는다[3].

병렬아크란 전기배선이나 전원 코드의 경년열화에 의하여 전선피복의 손상이나 문틈에 끼인다든지 무거운 물체 등에 눌러 압력을 받은 상태, 또는 지속적이고 반복적으로 굽혔다 펴졌다 하는 상태에서 도선(도체선)사이에 합선, 단락 등으로 인하여 발생하는 아크이다. 그리고 전기배선의 피복 손상으로 도선과 대지사이에서 발생하는 접지아크가 있으며, 이는 접지선의 절연능력이 약화된 경우 접지사고가 곧 바로 발생하지 않더라도 서지성 과도전압으로 탄화경로가 형성되어 발생한다[3][7-11].

### 2.2 시험장치 구성

주택의 배선에서 미소아크가 지속적으로 발생하는 경우 아크발생 지점에서 탄소가 생성된다. 전기화재는 아크에 의해 생성된 탄소에 큰 전류가 공급될 경우 점화에너지가 크게 발생하여 이로 인해 주변에 점화 매개물을 통하여 화재가 발생하게 된다. 본 논문에서는 전기화재와 직접적인 연관이 있는 정량적인 차단 시간/전류 특성과 아크고장의 에너지를 분석하였다. 이를 위하여 UL 1699 표준에서 제시하는 탄화경로 아크제거 시험(Carbonized Path Arc Clearing Time Test)을 실시하였고, 그림 2와 같이 시험 장치를 구성하였다[6][12-13].

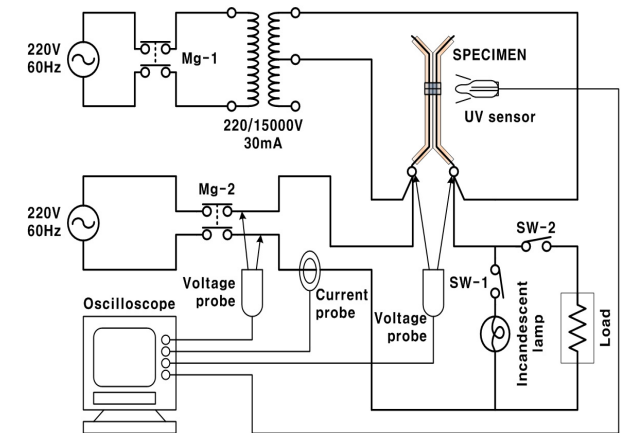


그림 2 탄화경로 아크제거 시험 장치 구성도

Fig. 2 Schematic for carbonized path arc tests(a)

#### 2.2.1 시험 전원

일반적인 배선에서는 탄화경로 생성에 많은 시간이 걸린다. 이를 보완하기 위하여 그림 2에서는 220/15,000 V 30 mA 정격의 2차측 중앙에 탭이 있는 변압기를 사용하도록 UL 1699에서 제시하고 있다. 즉, 220 V에서 생성되는 탄화경로를 좀 더 빠른 시간 내에 생성하기 위하여 15,000 V를 이용하는 것이다. 또한 탄화경로에 큰 전류가 흐르면 양 극간 단선되어 탄화경로가 형성되지 않으므로 30 mA 이하의 네온 변압기를 사용하였다.

### 2.2.2 자외선(UV)센서

아크고장으로 인해 점화용 숨이 점화되기까지의 시간 측정을 위하여 그림 3과 같은 자외선(UV) 센서를 이용하였다. 자외선 센서는 정밀도가 높고 간단하다는 장점을 갖고 있으며, 시험용 전선 위에 놓여진 점화용 숨이 점화되면 불꽃과 자외선이 발생되어 자외선 센서가 동작하는 원리를 이용하였다. 본 논문에서 적용한 자외선 센서는 일본 Hamamatsu사에서 개발한 센서로써 가스튜브 타입이고 형태는 그림 3과 같다.



그림 3 자외선(UV) 센서  
Fig. 3 Ultraviolet sensor

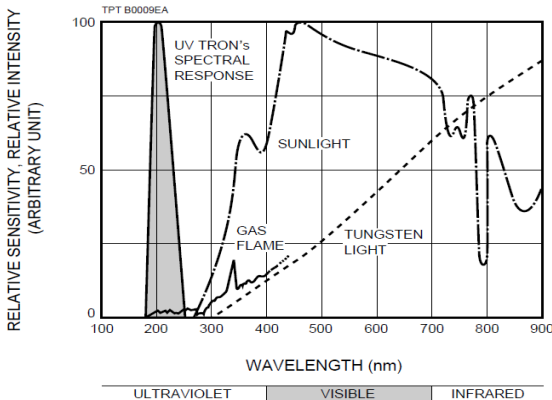


그림 4 자외선(UV) 센서 검출파장 영역  
Fig. 4 Detectable wavelength range of UV sensor

그림 4는 자외선 센서의 검출파장 영역을 나타낸다. 검출파장 영역은 180~280 nm의 코로나방전 범위 중 매우 짧은 파장대역에 집중되어 있으며, 기존의 센서에 비하여 상대적으로 잡음에 대한 영향이 적다.

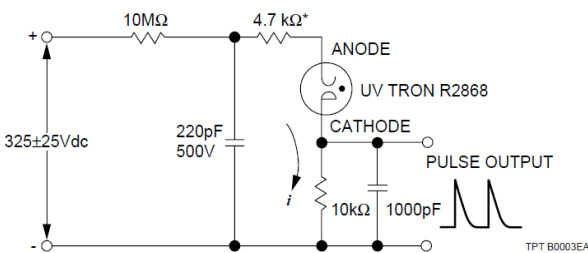


그림 5 자외선(UV) 센서 구동회로  
Fig. 5 Driving circuit for UV sensor

자외선 센서를 이용한 점화시간 측정 원리는 그림 5와 같이 Anode와 Cathode 양 전극에 300 V 정도의 DC 전압을 인가한 상태에서 가스가 채워진 튜브에 자외선 포톤이 입사되면 양 전극에 캐리어가 발생하여 A - K 간 도통되어 펄스

를 출력한다. 본 논문에서 사용한 자외선 센서의 동작 허용온도는 -20~60 ℃이며 감도는 5000 cpm이다.

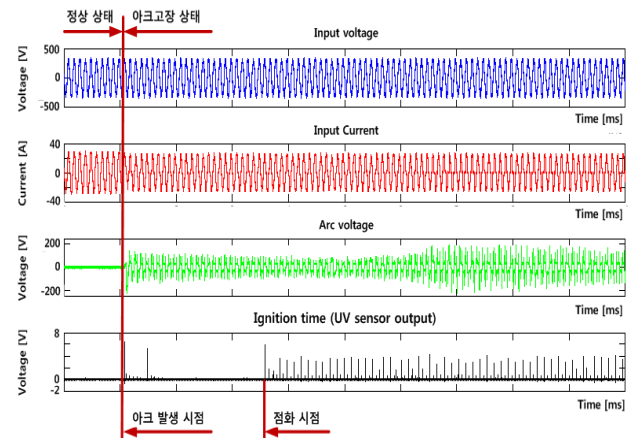


그림 6 점화시간 측정을 위한 자외선 센서 출력 신호  
Fig. 6 Output signal of UV sensor for measuring ignition time

그림 6은 점화용 숨이 점화되었을 때, 자외선 센서에서 출력되는 신호를 나타내며 5 V 임펄스 전압을 발생시킨다. 자외선 센서 출력 그래프를 살펴보면, 아크가 발생하고 점화용 숨이 점화되지 않은 상태에서는 자외선 센서 출력 신호가 없으며 점화용 숨이 점화되었을 경우에만 자외선 센서의 출력 신호가 지속되는 것을 알 수 있다. 따라서 아크고장이 발생하는 시점부터 자외선 센서 출력이 지속되는 시점까지를 점화 시간으로 판단하고 점화 시간을 계산하였다.

### 2.2.3 시험용 시료(전선)

미국 UL 1699 시험기준의 경우 주택용 SPT-2 Flexible Cord를 사용하도록 하고 있으나 본 시험에 사용하는 시료(전선)는 국내 전기사용환경에 적합하도록 주택용으로 사용하는 HIV 비닐절연전선 2.5 mm를 선정하였다. 아크고장 시험용 전선 제작은 UL 1699에서 제시하고 있는 시료 제작방법을 준용하여 다음과 같이 제작하였다[6][12-13].

- HIV 비닐절연전선 2.5 mm 두 가닥을 8 inch (203 mm)의 길이로 하여 자르고 양쪽 끝에서 2 inch (50.8 mm) 지점에 테이프를 고정시킨 다음 양쪽 끝은 안전을 위하여 1 inch (25.4 mm) 이상 이격시키고 한쪽 끝은 시험회로에 연결하기 위하여 1/2 inch (12.7 mm)정도 절연물(피복)을 제거한다.
- 시료의 한쪽 끝에서 3 inch (76.2 mm)지점에 두선의 절연물(피복)을 칼로 자른다. 이때, 도체가 손상이 되지 않도록 한다.
- 칼로 절연물을 자른 지점에는 PVC 절연테이프를 두 번 감고 그 위에 유리섬유테이프를 다시 두 번 감는다.

이외에 시험장치 구성에 있어 시료(전선)에 탄화경로를 만들기 위하여 10초 간격으로 전원을 공급하도록 Relay와 Timer를 사용하였으며, 탄화경로 형성정도를 확인하기 위하여 100W 백열전구를 사용하였다. 또한, 시험부하로는 순수 저항 부하로 5 A, 10 A, 20 A 등을 적용하였으며 시험결과를 계속

하기위하여 오실로스코프를 사용하여 입력전압과 아크발생시 전압, 아크발생시 전류, 점화시간을 측정하도록 구성하였다.

### 2.2.4 시험 절차

시험절차는 시료(전선)에 탄화경로를 만들어 아크제거시간(아크차단기 동작시간)시험을 위하여 그림 2의 시험 회로에 의하여 시험한다[6][12-13].

- Mg-1을 on (이때 Mg-2는 off 상태) 한다. 시험전원인 220/1,500 V, 30mA 정격의 내온변압기를 이용하여 7.5 kV를 10초 간격으로 시료 양단에 인가한다.
- 시료(전선)의 절연물을 자르고 테이핑을 한 부분에서 연기가 나면서 서서히 탄화가 형성된다.
- 탄화형성 정도를 확인하기 위하여 sw-1을 on (이때 sw-2는 off 상태) 하여 100W 백열전구가 완전히 점등이 되었는지를 확인한다.
- 탄화경로가 완전히 형성이 되면 그 부분에 점화 슝(의학용 슝)을 얹어 놓는다.
- Mg-2를 on (Mg-1은 off 상태) 하여 전등회로의 정격 전압인 220V를 공급한다. 이때 sw-2를 on (sw-1은 off 상태) 하여 순수저항 부하인 5 A에 대하여 시험한다.
- 아크가 발생하면서 점화 슝에 점화되는 시간을 자외선(UV)센서를 이용하여 오실로스코프로 측정한다.

이와 같은 방법으로 5 A에 대하여 12 회를 실시하였으며 시료는 매회 새로운 시료로 시험을 실시하였다. 5 A 부하가 끝난 다음 10 A와 20 A에 대하여도 매 부하마다 12 회 씩 단계적으로 시험을 실시하고 결과를 분석하였다.

## 3. 시험결과 분석

### 3.1 아크고장 차단시간 및 점화확률 분석

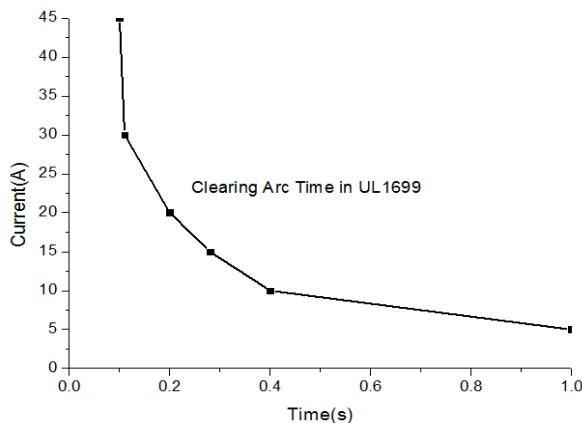


그림 7 120 V 아크고장 차단 시간/전류, UL 1699  
Fig. 7 Clearing Arc Time/Current values specified in UL 1699 Standard at 120 V

그림 7은 UL 1699 표준에서 제시된 시험전류에 따른 직렬 아크고장 차단시간 그래프이다. 전기화재를 예방하기 위한 아크차단기(AFCI)는 그림 7에서 제시하는 아크고장 차단시간 이내에 배선에서 발생하는 직렬 아크고장을 검출하고 전원을

차단하여야 한다. 즉, 시험전류 5 A 에서 1초 이내, 10 A 전류에서 0.4초 이내, 20 A 전류에서 0.2초 이내에 전원을 차단하여야 한다. 표 2는 그림 7의 내용을 요약한 것이다.

표 2 120 V 아크고장 차단 시간/전류, UL 1699  
Table 2 Clearing Arc Time/Current values at 120 V

전류(A)	5	10	15	20	30	45
차단시간(초)	1	0.4	0.28	0.2	0.11	0.1

그림 8는 참고문헌 [13]에서 제시하는 120 V, 10-30 A 전류 시험에서 얻어진 점화 확률 그래프를 보여준다. 각각의 전류는 차단시간이 변화됨에 따라 점화 확률이 변화되는 것을 알 수 있다. 시험에 사용한 전선은 60 °C, SPT-2 이다. 아크고장이 발생할 경우, 점화를 유도하기 위한 방법으로 의료용 슝을 아크고장 발생 지점을 감았다. 점화 시간 측정은초고속 카메라를 이용하였다. 시험 결과를 요약하면 다음과 같다.

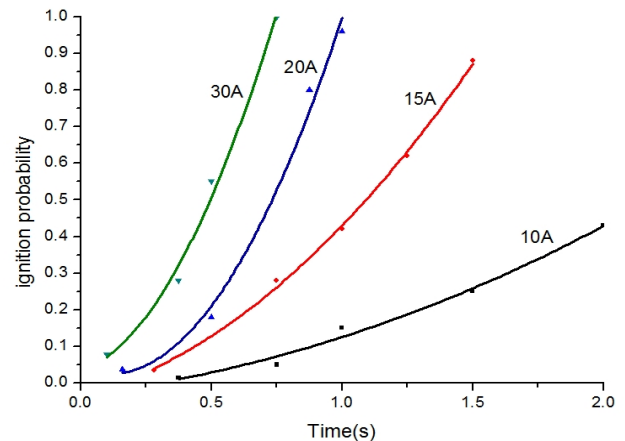


그림 8 120 V, 10-30 A 에서의 60 °C SPT 전선의 점화확률  
Fig. 8 Ignition Probability of rated 60 °C SPT wire specimens at 120 V and at the currents of 10 - 30 A

10 A 전류가 흐르는 배선에서 아크고장이 발생할 경우, 0.4초 이내에 아크고장을 차단하면 점화될 확률은 0.015 (1.5%)이며 2초에 아크고장을 차단하면 점화될 확률은 0.43 (43%)이다. 15 A 전류가 흐르는 배선에서 아크고장이 발생할 경우, 0.28초 이내에 아크고장을 차단하면 점화될 확률은 0.035 (3.5%)이며 1.5초에 아크고장을 차단하면 점화될 확률은 0.88 (88%)이다. 20 A 전류가 흐르는 배선에서 아크고장이 발생할 경우, 0.2초 이내에 아크고장을 차단하면 점화될 확률은 0.037 (3.7%)이며 1초에 아크고장을 차단하면 점화될 확률은 0.96 (96%)이다. 30 A 전류가 흐르는 배선에서 아크고장이 발생할 경우, 0.11초 이내에 아크고장을 차단하면 점화될 확률은 0.078 (7.8%)이며 0.75초에 아크고장을 차단하면 점화될 확률은 0.99 (99%)이다.

그림 8의 내용을 정리하여 표 3으로 나타내었다. UL 1699 표준에서 제시하는 기준으로 각각의 전류에서 아크고장을 차단할 경우, 전기화재는 7.8% 이내로 예방할 수 있음을 알 수 있다.

표 3 120 V 60 °C SPT-2 전선의 점화 확률

Table 3 Ignition probability of rated 60 °C SPT-2 wire specimens at 120 V

전류(A)	10	15	20	30
차단시간(초)	0.4	0.28	0.2	0.11
점화확률	0.015	0.035	0.037	0.078

UL 1699 표준에서는 입력 전압이 120 V 일 경우와 240 V 일 경우, 동일한 시험기준을 적용하고 있다[12-13]. UL 1699 표준에서 제시하는 시험 방법과 동일한 방법으로 국내 전압과 국내에서 사용하는 전선을 이용하여 아크고장으로 인한 점화시간을 측정하였고 각각의 전류에 대한 점화확률을 계산하였다. 시험 전압은 220 V이며 시험전류는 5 A, 10 A, 20 A 등 3 종류를 실시하였다. 시험용 전선은 국내 주택용 배선으로 가장 많이 사용하고 있는 75 °C, HIV 2.5 mm<sup>2</sup> 전선을 사용하였다. 시험 횟수는 각 전류마다 12 회씩 실시하여 측정하고 분석하였다.

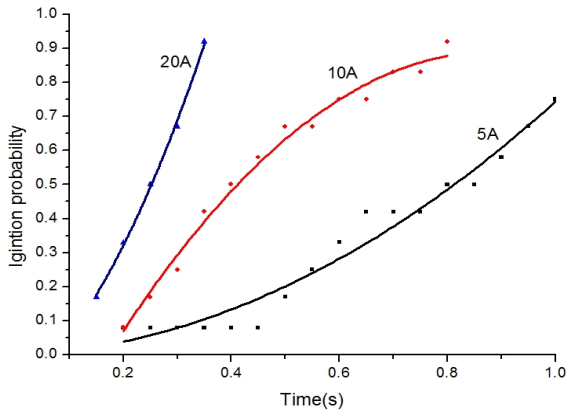


그림 9 220 V, 5-20 A에서의 70 °C HIV 전선의 점화확률  
Fig. 9 Ignition probability of rated 70 °C HIV wire specimens at 220 V and at the currents of 5 - 20 A

그림 9는 220 V 시험에서 얻어진 점화확률 그래프를 보여준다. 각각의 전류는 차단시간이 변화됨에 따라 점화 확률이 변화되는 것을 알 수 있다. 시험 결과를 요약하면 다음과 같다.

5 A 전류가 흐르는 배선에서 아크고장이 발생할 경우, 1 초 이내에 아크고장을 차단하면 점화될 확률은 0.74 (74%)이며 0.5초에 아크고장을 차단하면 점화될 확률은 0.20 (20%)이다. 10 A 전류가 흐르는 배선에서 아크고장이 발생할 경우, 0.4초 이내에 아크고장을 차단하면 점화될 확률은 0.48 (48%)이며 0.8초에 아크고장을 차단하면 점화될 확률은 0.87 (87%)이다. 20 A 전류가 흐르는 배선에서 아크고장이 발생할 경우, 0.2초 이내에 아크고장을 차단하면 점화될 확률은 0.32 (32%)이며 0.3초에 아크고장을 차단하면 점화될 확률은 0.69 (69%)이다.

그림 9의 내용을 정리하여 표 4로 나타내었다. UL 1699 표준에서 제시하는 120 V 아크고장 차단시간 기준을 220 V 국내 전압과 국내 전선에 적용할 경우, 전기화재는 74% 이

표 4 220 V 70 °C HIV 전선의 점화 확률

Table 4 Ignition probability of rated 70 °C HIV wire specimens at 120 V

전류(A)	5	10	20
차단시간(초)	1	0.4	0.2
점화확률	0.74	0.48	0.32

내로 예방할 수 있음을 알 수 있다. 즉, 120V 에서는 1.5%의 점화 확률이, 220 V에서는 74%로 증가하였다. 국내에서 UL 1699 기준을 아크차단기에 적용할 경우에는 UL에서 기대하는 전기화재를 예방할 수 없음을 알 수 있다.

### 3.2 아크고장 에너지 분석

탄화경로 아크제거 시험(Carbonized path arc clearing time test)에 의해 배선에서 아크고장이 발생하면, 아크고장이 발생하는 시점부터 아크고장 에너지가 발생되어 빛과 열로 방출된다. 발생한 아크 에너지는 아크 발생 지점에 놓인 점화용 솜을 점화시킨다. 그림 9와 표 4를 이용하여 아크고장으로 발생하는 아크고장 에너지를 계산하였다. 아크고장 에너지를 계산하기 위하여 5 A, 10 A, 20 A 전류에서 각각 12 회씩 반복 시험한 결과를 표 5에 나타내었다. 표 5는 아크고장이 발생한 시점부터 점화용 솜이 점화되기까지의 시간을 반주기 개수로 표시한 것이다.

표 5 전류별 점화시간(반주기 개수)

Table 5 Ignition time at currents 5-20 A

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5A	68	60	114	162	73	107	94	137	79	25	119	287
10A	47	58	29	52	94	36	86	104	125	43	72	42
20A	40	38	42	41	42	29	21	25	22	80	27	20

표 5에서 제시하는 데이터를 분석하면, 전류가 낮을수록 반주기 개수가 많아지고 전류가 높을수록 반주기 개수가 적어짐을 알 수 있다. 즉, 전류가 낮을수록 점화용 솜이 점화되기까지의 시간이 길어진다.

본 논문에서 아크고장으로 발생하는 에너지를 주울 열(Joule's heat)로 계산하였다. 정상상태에서 즉, 아크고장이 없는 경우, 식 (1)에 의해 전압 220 V, 전류 5A 일 경우, 1 초 동안의 에너지는 1,100 J이다. 그러므로 반주기당 에너지는 9.2 J 이며, 10 A 일 경우에는 18.3 J, 20 A일 경우에는 36.7 J이다.

$$E = P(W) \cdot t(s) \tag{1}$$

아크고장으로 인해 발생하는 아크고장 에너지를 계산하기 위하여 아크고장 발생 시, 아크고장 발생 지점의 양단에서 발생하는 아크전압과 전류를 측정하여 아크고장 에너지를 계산하였다. 계산 결과, 5 A 전류에서 발생하는 아크고장 에너지는 반주기당 1.5 J이며, 10 A 전류에서 발생하는 아크고장 에너지는 2.5 J, 20 A 전류에서 발생하는 아크고장 에너지는 4.5 J로 나타났다.

그림 10은 각각의 전류에서 발생하는 반주기 아크에너지를 나타낸 것이다. 전류가 5 A에서 10 A로 2배 증가하였을 경우 아크에너지는 1.5 J에서 2.5 J로 1.7배 증가하였고, 10 A에서 20 A로 2배 증가하였을 경우에 아크에너지는 2.5 J에서 4.5 J로 1.8배 증가함을 알 수 있다.

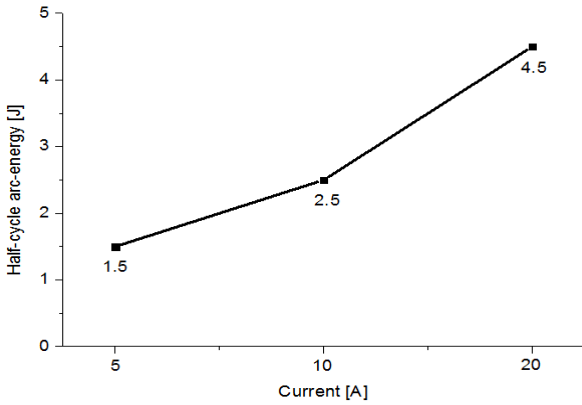


그림 10 전류별 반주기 아크에너지  
Fig. 10 Arc energy per half-cycle for ignition

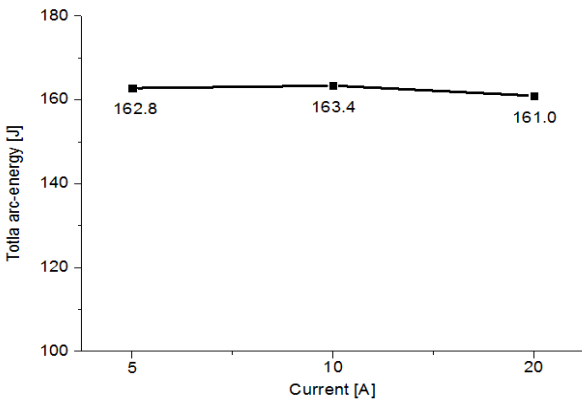


그림 11 점화되기까지 전류별 아크에너지  
Fig. 11 Total arc energy for ignition

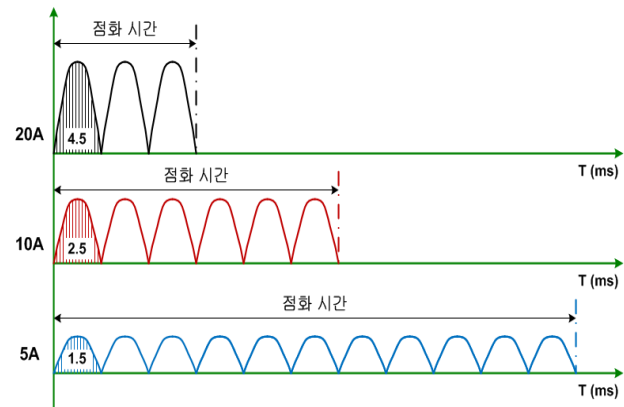


그림 12 전류별 반주기 아크에너지와 점화 시간  
Fig. 12 Ignition time and arc energy per half-cycle by currents 5A-20A

그림 11은 점화용 숨이 점화되기까지 발생하는 총 아크에너지를 나타낸 것이며, 전류가 2배씩 증가하였으나 총 아크에너지는 161.0-163.4 J로 거의 일정함을 알 수 있다. 즉, 그림 9와 같이 전류가 증가하면 반주기당 아크고장 에너지는 증가하지만 점화용 숨이 점화되기까지의 시간이 감소하여 점화를 위한 총 아크에너지는 전류별 거의 일정함을 알 수 있다.

그림 12는 각 전류별 점화시간과 반주기 아크고장 에너지를 그래프로 나타낸 것이며, 표 6은 아크고장이 발생할 경우, 반주기당 소비되는 아크에너지 및 점화시간까지 발생하는 전체 아크에너지를 정리한 것이다. 반주기당 소비되는 아크에너지는 각 정상상태 에너지 9.2 J, 18.3 J, 36.7 J의 12-16%에 해당됨을 알 수 있다.

표 6 전류별 반주기 에너지와 점화 아크에너지  
Table 6 Half-cycle and total arc-energy for ignition

측정 전류	5 A	10 A	20 A
반주기 아크에너지 [J]	1.5	2.5	4.5
점화 아크에너지 [J]	162.8	163.4	161.0

### 3.3 아크고장 전류 및 임피던스 분석

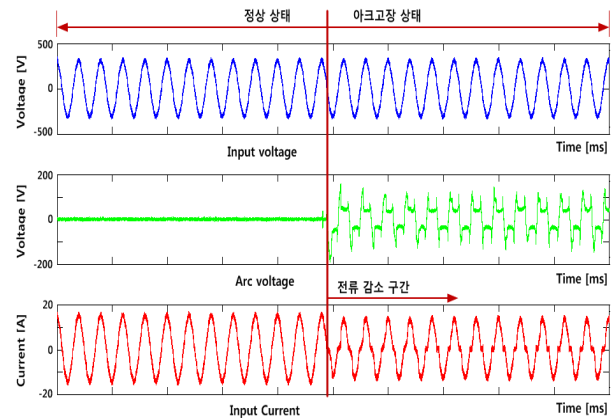


그림 13 아크고장으로 인한 전류 감소 현상  
Fig. 13 Comparison of normal current and arc-fault current

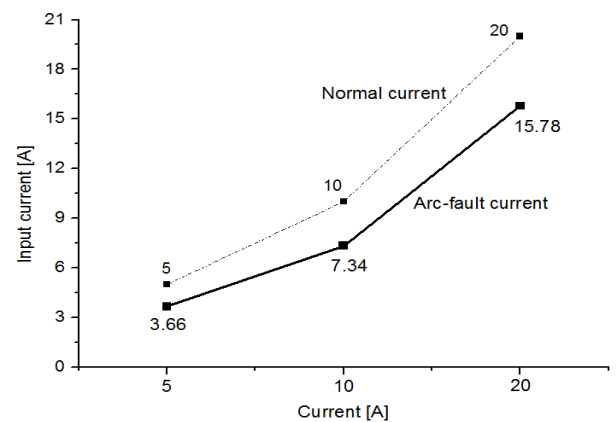


그림 14 아크고장으로 인한 전류 감소량  
Fig. 14 Current reduction due to arc-fault

직렬 아크고장이 발생하면 그림 13과 같이 전류가 감소하고 shoulder가 발생하는 특징을 갖는다. 아크고장으로 인해 변화되는 전류와 임피던스를 분석하기 위해 전류의 조건을 각각 5 A, 10 A, 20 A로 구분하였다.

그림 14는 5 A, 10 A, 20 A 전류에서 아크고장으로 인해 감소되는 전류를 나타내었고 각각의 전류에서 3.66 A, 7.34 A, 15.78 A로 감소됨을 알았다.

표 7을 통해 각각의 전류 감소량을 정리하였으며 감소율은 0.26, 0.26, 0.21로 나타났다. 즉, 전류가 변화하여도 아크고장으로 인해 감소되는 전류의 감소율은 거의 일정하게 21-26%로 나타남을 알 수 있다.

표 7 아크고장으로 인한 전류 감소율

Table 7 Decrease rate of current due to arc-fault

전류(A)/전압(V)	5/220	10/220	20/220
정상 시 입력전류 (A)	5	10	20
아크고장 시 입력전류 (A)	3.66	7.34	15.78
감소율	0.26	0.26	0.21

그림 15는 5 A, 10 A, 20 A 전류에서 아크고장으로 인해 증가되는 임피던스 증가 나타내었다. 5 A, 10 A, 20 A에서 각각 60.2 Ω, 29.9 Ω, 13.9 Ω으로 증가됨을 알았다.

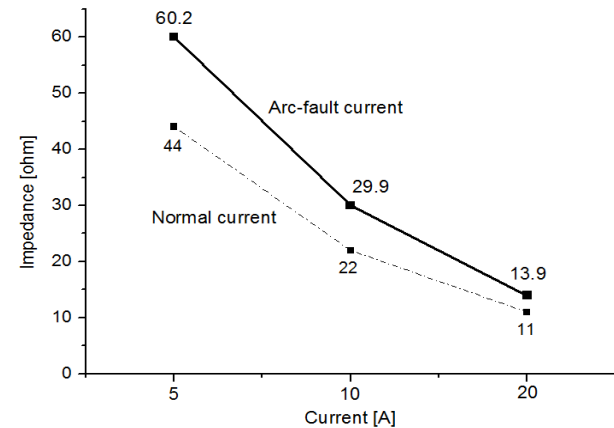


그림 15 아크고장으로 인한 임피던스 증가량

Fig. 15 Increase of impedance due to arc-fault

표 8에 각각의 임피던스 증가량을 정리하였으며 증가율은 0.36, 0.36, 0.27로 나타났다. 즉, 전류가 변화하여도 아크고장으로 인해 증가되는 아크 임피던스의 증가율은 거의 일정하게 27-36%로 나타남을 알 수 있다.

표 8 아크고장으로 인한 임피던스 감소율

Table 8 Decrease rate of impedance due to arc-fault

전류(A)/전압(V)	5/220	10/220	20/220
정상 시 임피던스 (Ω)	44	22	11
아크고장 시 임피던스 (Ω)	60.2	29.9	13.9
증가율	0.36	0.36	0.27

#### 4. 결 론

본 논문에서는 UL 1699 표준에서 제시하는 120 V 직렬 아크고장 차단시간을 국내 사용전압인 220 V와 HIV 전선에 적용할 경우, 아크고장으로 인한 점화 확률과 아크고장 에너지를 분석하였다. 5 A 전류가 흐르는 배선에서 아크고장이 발생할 경우, 1초 이내에 아크 고장을 차단하면 점화 확률은 0.74 (74%)이고 10 A 전류가 흐르는 배선에서 아크고장이 발생할 경우, 0.4초 이내에 아크고장을 차단하면 점화 확률은 0.48 (48%)이며 20 A 전류가 흐르는 배선에서 아크고장이 발생할 경우, 0.2초 이내에 아크고장을 차단하면 점화 확률은 0.32 (32%)임을 알았다. UL 1699 표준에서 제시하는 120 V 아크고장 차단시간 기준을 220 V 국내 전압과 국내 전선에 적용할 경우, 120 V에서 1.5%인 점화 확률이 220 V에서 74%로 증가함을 알 수 있었다. 결론적으로 UL 1699 표준에서 제시하는 직렬 아크고장 차단시간 기준을 국내 아크차단기에 적용할 경우에는 UL에서 기대하는 전기화재를 예방할 수 없음을 알 수 있었다.

그리고 직렬 아크고장으로 발생하는 아크 고장 에너지를 계산하였다. 전류가 5 A에서 10 A로 2 배 증가 하였으나 아크고장 에너지는 반주기당 1.5 J에서 2.5 J로 1.7 배 증가하였고, 10 A에서 20 A로 2 배 증가할 때, 아크고장 에너지는 반주기당 2.5 J에서 4.5 J로 1.8 배 증가함을 알 수 있었다. 또한 전류가 변화되어도 점화용 숨이 점화되기까지 총 아크에너지는 161.0-163.4 J로 거의 일정함을 알 수 있었다. 또한 직렬 아크고장으로 인해 발생하는 에너지는 정상상태 입력 에너지의 12-16%에 해당됨을 알 수 있었다.

저항 부하에서 직렬 아크고장이 발생하면 전류가 감소하는 특징을 갖는다. 분석결과, 아크고장으로 인해 감소되는 전류의 감소율은 정상상태의 21-26%로 나타났으며 전류가 변화하여도 거의 일정함을 알 수 있었다. 이에 따른 임피던스 증가량을 분석한 결과, 아크고장으로 인해 증가되는 아크 임피던스는 정상상태의 27-36%로써 전류가 변화하여도 거의 일정함을 알 수 있었다.

#### References

- [1] Korea Electrical Safety Corporation "A Statistical Analysis on the Electrical Accidents in 2011", 2012
- [2] George D. Gregory, Fellow, IEEE, Kon Wong, and Robert F. Dvorak, "More About Arc-Fault Circuit Interrupters", IEEE, 2004
- [3] Sun-Bae Bang, "Analysis Method for Series Arc Fault Current using Approximation Coefficients of Discrete Wavelet Transform", PhD dissertation, Kangwon University, 2009
- [4] Gerard Winstanley, "Expanding Home Safety with AFCIs", IAEA NEWS, January-February, 2008
- [5] "Understanding 2005-2008 Code Changes", Eaton Corporation, 2007.
- [6] Underwriters Laboratories Inc. UL 1699, "Arc-Fault Circuit Interrupters", May, 2003
- [7] Wang-Sung Kwon, Su-Kyung Choi, Chung-Hwan

Ban, Sung-Bae Bang, Chong-Min Kim, and Gyu-Ha Choe, "A Study on the Effect of Arc Fault on Switched-Mode Power Supply", IEEE, 2011

- [8] Gi-Jong Ban, Lark-Kyo Kim, "Arc Fault Circuit Interrupter Design for Electrical Fire Protection", Trans. KIEE, Vol.55, No.5, p220-225, MAY, 2006
- [9] Seok-Hwan Jeong, "A study on the economic utility of the introduction of AFCI for the prevention of Electrical fires", Thesis for Master Degree, University of Seoul, 2007.
- [10] Sang-Pil Ahn, Sik Moon, Chul-Hwan Kim, "Application of Test Standard for Arc-Fault Circuit Interrupter", KIEE summer conference 2003, p876-878, 2003.
- [11] Doo-Hyun Kim, Jong-Young Park, Sung-Chul Kime, Jong-Ho Lee, "Development of Monitoring Program for Detecting Current and Voltage Signals for Series Arc" Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 25, nu 2, p29-34, 2010.
- [12] D.Kolker, S. Campolo, N. Disalvo, "A study of Time/Current Characteristics of the Ignition Processes in Cellulosic Material Caused by Electrical Arcing for Application in 240V Arc-Fault Circuit Interrupters", IEEE, 2007
- [13] John J. Shea, "Comparing 240 Vrms to 120 Vrms Series Arcing Faults in Residential Wire", IEEE, 2008



**방 선 배 (方 善 培)**

1968년 5월 18일생. 1994년 명지대학교 전기공학과 졸업. 2002년 강원대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2003년~ 현재 전기안전연구원 책임연구원.

Tel : 031-580-3074

E-mail : bimil5018@naver.com



**김 재 철 (金 載 哲)**

1955년 7월 12일생. 1979년 숭실대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 숭실대학교 공과대학장, 전기공학부 교수, 본 학회 부회장

Tel : 02-817-0647

Fax : 02-817-0780

E-mail : jckim@ssu.ac.kr

저 자 소 개



**고 원 식 (高 元 植)**

1952년 10월 18일생. 1996년 호원대학교 전기공학과졸업(학사). 2009년 광운대학교 정보통신대학원졸업(석사). 2011년 숭실대학교 전기공학과 박사수료. 2004.1~2011.6 전기안전연구원장. 현재 주)헤코 부사장

Tel : 02-6342-7010

E-mail : kows1018@hanmail.net



**문 원 식 (文 原 植)**

1982년 2월 15일생. 2009년 숭실대학교 전기공학과 졸업(학사). 2011년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 02-824-2416

E-mail : chriswsmoon@ssu.ac.kr