

## 저압용 누전차단기의 차단특성 및 그래파이트 분석에 관한 연구

### A Study on the Cut Off Characteristics and Graphite Analysis of Residual Current Protective Devices for Low Voltage

최충석\* · 이경섭\*\* · 정재희\*\*\* · 박수홍\*\*\*\* · 김병수\*\*\*\* · 이덕출\*\*\*\*

C.S. Choi · K.S. Lee · J.H. Chung · S.H. Park · B.S. Kim · D.C. Lee

(1998년 6월 25일 접수, 1999년 3월 2일 채택)

#### ABSTRACT

In this paper, we studied cut off characteristics and fire hazard of residual current protective devices(RCD or ELB) for low voltage. The operative time of RCD with grounding resistance was analyzed by using RCD operating tester. The surface structure and composition of insulator were analyzed by using scanning electron microscope(SEM) and energy dispersive x-ray spectroscopy(EDX). The surface of phenol resin showed network structure and void. The spectra shown in EDX analysis are composed not only of the corresponding elements but also of several new spectra, as CK,  $OK\alpha$ , MgK, SiK, and CaK, which were absent in original material.

#### 1. 서론

전기화재는 전체화재중 34.9%('96년도)를 차지하고 있으며 피해 또한 점점 대형화 되어가고 있다. 전기화재는 여러 가지 원인에 의해 발생하고 있으며 이 중에서 누전에 의한 화재가 약

8%를 점유하고 있다<sup>1)</sup>. 이런 재해로부터 설비를 보호하기 위한 방법중의 하나가 누전차단기(residual current protective device; RCD or earth leakage breaker; ELB)를 시설하는 것이며, Kurt Nowak<sup>2)</sup>에 의해서 최초로 발표되었다. 그 당시에는 인체 통전 전류의 한계치를 50mA·sec로 설

\* 한국전기안전공사 전기안전시험연구원

\*\* 동신대학교 전기전자공학과

\*\*\* 서울산업대학교 안전공학과

\*\*\*\* 인하대학교 전기공학과

정하고 10배의 안전율을 취하여 정격동작전류 50mA인 RCD가 0.1sec 이내에 차단 완료되면 인체보호는 물론 누전화재까지 예방할 수 있는 것으로 알려졌다<sup>3,4)</sup>. 1939년 영국에서는 전압동작형 누전차단방식이 연구 발표되었으며, 미국에서는 1962년 감도전류 5mA의 차단방식이 발표되었다<sup>5)</sup>. 그후 지속적인 연구결과로 안전한계범위는 구체화되어 1969년 이후에는 IEC TC-64를 새롭게 보완하게 되었다. 현재 사용되고 있는 누전차단기는 주로 전류동작형이며, 영상변류기(zero phase sequence current transformer; ZCT) 입·출력 전류의 차를 응용한 것이다. 이런 누전차단기가 제품결함, 노화 및 관리소홀 등으로 기능을 발휘하지 못할 때 도리어 재해의 원인이 된다. 재해가 발생한 RCD는 일반적으로 외형관찰, 내부동작핀의 작동여부, 절연물의 탄화 및 내부전선의 조성변화를 통해서 사고의 원인을 규명할 수 있다<sup>6,7)</sup>.

따라서 본 연구에서는 저압에서 많이 사용하는 저압용 전류동작형 電子式 열동형 과부하결용 RCD의 인가전압에 따른 차단특성, 결선상태에 따른 동작여부, 절연물의 탄화 등을 누전차단기시험기, 주사전자현미경, 에너지분산 X선 분광분석기 및 열시차분석기 등으로 분석하여 전기화재 해석기법에 적용하고자 한다.

## 2. 실험방법

한국산업규격 KS C 4613에 규정되어 있는 RCD에 대해서 실험을 하였다<sup>8)</sup>. 단상 3선식으로 전원을 공급받는 주택에 주로 사용하는 정격전류 30A, 정격감도전류 30mA, 동작시간 0.03sec의 저압용 전류동작형 전자식 열동형 과부하결용 RCD는 정격전류의 1배 전류에서 동작하지 않고 1.25배 또는 2배의 전류가 흐를 경우 각각 60분 또는 2분 이내에 동작해야 한다.

Fig. 1은 접지저항에 따른 차단기의 동작시간 및 결선상태별 동작여부를 알아보기 위한 실험장치도이다. 차단기동작분석기(motion analyzer)의 동작전압은 AC 220V(Programma, TM-1600 MA 31, Sweden)를 사용하였으며, 이 때 차단기 1차측 입력전압은 회로도에 나타낸 바와

같이 전압조정기(Daelim ele., 20A, 10kV)를 이용하여 50~242V를 변화시키며 측정하였다.

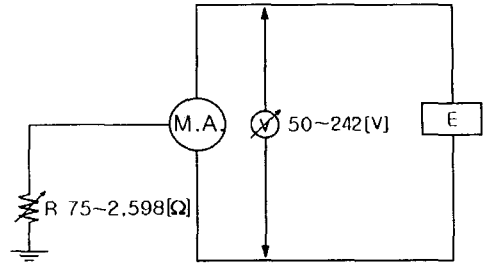


Fig. 1 Measurement of response characteristic with grounding resistance

대부분의 누전차단기 외함은 PVC 계열의 페놀수지(phenol resin)로 되어 있다. 그런데 이 수지가 전기적 또는 열적요인 등에 의해 열화(劣化)가 되면 조직의 변화에 의한 탄화물이 생성된다. 따라서 이들의 생성여부 및 조성 등을 밝히기 위해서 주사전자현미경(SEM, JEOL JSM-6400, Japan) 및 에너지분산 X선 분광분석기(energy dispersive x-ray spectroscopy; EDX, Oxford, England)를 이용하였다. 또한, 탄화물(그래파이트)의 원소변화는 EDX에 의한 linescan 스펙트라를 분석함으로써 해석하였다. 그리고 차단기 내부에 사용된 고무절연물의 온도 의존성은 열시차분석기(differential thermal analysis; DTA)를 이용하여 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 단상 30A, 정격감도전류 30mA, 동작시간 0.03sec의 전류동작형 電子式으로 접지저항값을 가변 접속하며 차단기동작분석기를 사용하여 차단동작 시간을 측정하였다. 접지저항이 2,500Ω까지는 0.03sec 이내에 차단되었으나, 2,500Ω 이상에서는 정격차단시간 이내에 차단기가 동작하지 않았다. 즉, 이 정도의 저항값에서 장시간 노출되는 경우 차단기 내부 부품들의 열화(劣化)가 가속되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 2,500Ω 이상의 접지저항이 장시간 지속되면 RCD는 본래의 기능을 발휘하지 못하므로 선

로에 에너지가 누적되지 않도록 해야 한다.

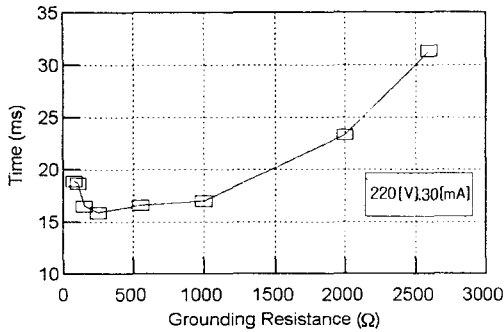


Fig. 2 Operative time of RCD with grounding resistance

차단기를 최초 설치하여 일정시간 사용하게 되면 선로의 점검 및 보수, 설비 변경 등의 이유로 입력단과 출력단의 전선을 분리하는 경우가 있다. 그런데 이런 과정에 있어서 간혹 입·출력 전선을 잘못 연결하여 사고가 발생한 사례가 보고되고 있다<sup>9)</sup>. 따라서 본 연구에서는 인위적으로 극한 상황을 설정하여 실험을 하였다. Fig. 3과 4는 정·역 결선시 인가전압을 변화시켰을 때 RCD의 차단동작 유무 및 동작시간을 각각 나타낸 것이다. 인가전압범위는 NEC, IEEE, VDE-0100, 일본 전기설비기술기준, 한국 전기설비기술기준 등을 참고로 하여 50~242V까지 인가하였다<sup>10~13)</sup>. 정결선의 경우 50V 인가시 차단시간이 약 18ms이었으며, 그 이상의 전압을 인가하면 차단시간의 변화가 거의 없다. 역결선의 경우 인가전압이 정격전압보다 낮은 경우 차단되지 않았으며, 220V부터 차단되었다. 즉, 1차측과 2차측을 역접속한 경우 정격전압보다 낮은 전압이 인가되면 차단기가 동작하지 않음을 알 수 있다. 이와 같은 결과로 미루어 불 때 선로의 점검 및 검사에 각별한 주의가 필요하다. 또한, 이런 사고를 예방하는 한 방법으로 단자를 분리시키지 말고 점검하는 것도 효과적인 것으로 생각된다.

Photo. 1은 누전차단기의 작동상태를 나타낸 것이다. 일반적으로 외부적인 손상이 없이 작동한 차단기는 작동손잡이의 위치에 따라 회로상태를 판단할 수 있다. 그러나 화재가 발생하여 외부 케이스가 손상을 입으면 외형을 보고 작동

여부를 판단하기가 대단히 어렵다. 따라서 그림에서 보여주는 바와 같이 외부 손상부분을 조심스럽게 제거한 후 작동핀의 방향을 살펴보면 차단기의 작동상태를 알 수 있다. 즉, 누전차단기를 수직방향으로 놓았을 때 작동핀(금속)의 위치가 거의 수평(하얀원 안의 표시)으로 되어 있으면 차단기는 ON 상태에서 소실된 것이며, 작동핀의 방향이 아래쪽(하얀원 안의 표시)으로 기울어져 있으면 차단기는 OFF 상태에서 소실된 것이다. 즉, 이를 근거로 스위치의 작동여부를 판별할 수 있다.

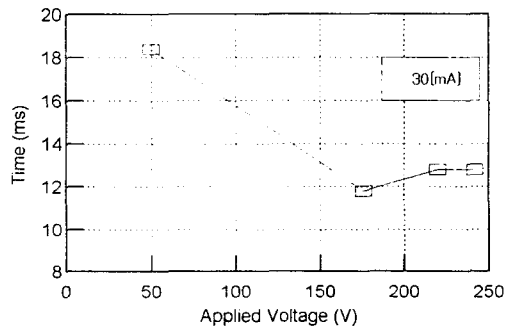


Fig. 3 Relation of applied voltage and operative time (normal connection)

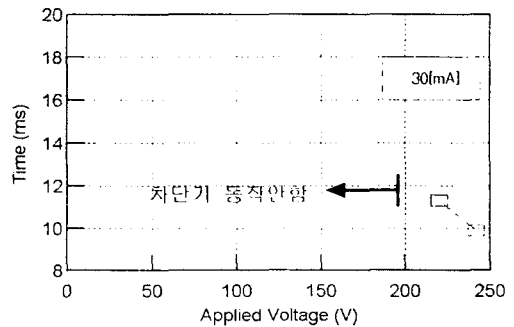


Fig. 4 Relation of applied voltage and operative time (reverse connection)

Photo. 2의 (a)는 차단기 외함 단자간의 트래킹(tracking)이 발생했을 때의 SEM 사진이다. 트래킹이 발생할 때의 전압은 220V이며, SEM 측정시 조건은 가속전압 15kV, W<sub>d</sub>(work distance) 15mm, 배율 500이다. 이 사진에서 알 수

있듯이 그라파이트(graphite)가 성장된 것으로 여겨지는 작은 알갱이 모양의 구조가 고르게 보이고 있다. 이런 구조는 그라파이트 성장의 일반적인 형태이다. 즉, 극간의 미소방전(scintillation)에 의해 탄화물이 성장된 모습을 보여주고 있다<sup>14)</sup>.

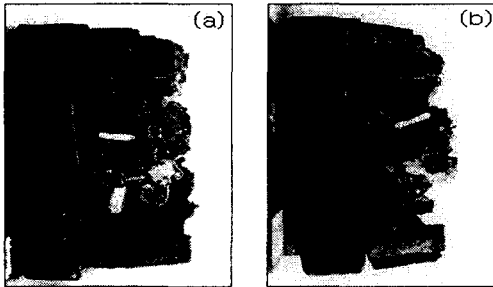


Photo. 1 Operative state of residual current protective devices (a) ON, (b) OFF

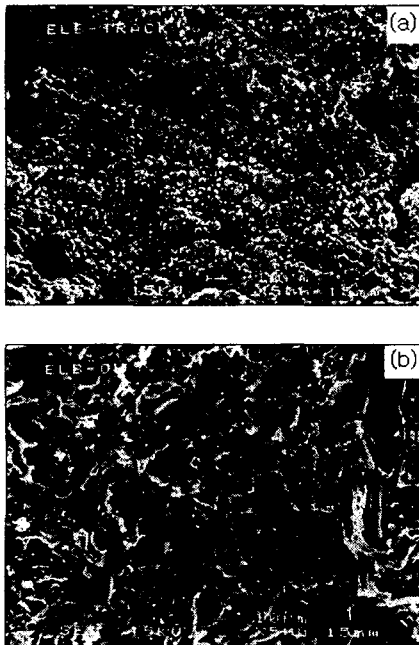


Photo. 2 Scanning electron microscope of residual current protective devices case (a) graphite, (b) outside fire

Photo. 2의 (b)는 외부화염(gas torch)에 의해

소실된 차단기 외함을 (a)와 동일한 조건에서 측정된 사진으로 전체에 걸쳐 망상구조(network structure)와 보이드(void)를 보이고 있다. 이것은 수지상 고분자의 한 형태로 점진적인 열원에 의해 조직이 변화된 것이다. 즉, 이와 같이 생성된 물질을 비교·분석함으로써 에너지원을 밝힐 수 있을 뿐만 아니라 화재감정 기법의 과학화를 이룰 수 있다.

Fig. 5는 Photo. 2와 같은 조건의 차단기 외함을 EDX에 의해 linescan한 스펙트라이다. Fig. 5(a)는 차단기 외함의 전원측 단자 부분의 EDX 분석으로 CK, OK $\alpha$ , MgK, SiK, CaK 등 다양한 원소의 스펙트라를 볼 수 있다. 특히, 미소방전에 의해서 생성된 것으로 여겨지는 CK가 다량 함유하고 있음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 5(b)는 외부화염에 의해 소손된 외함의 linescan 스펙트라이다. 여기서는 무시 가능한 극소량의 원소는 보정 과정에서 무시하였으며, CaK 스펙트라는 전체에 걸쳐 발견되었다. 즉, SEM에 의한 표면구조에서도 알 수 있었듯이 외부화염에 의해서는 조직 및 조성의 변화가 미약함을 알 수 있다.

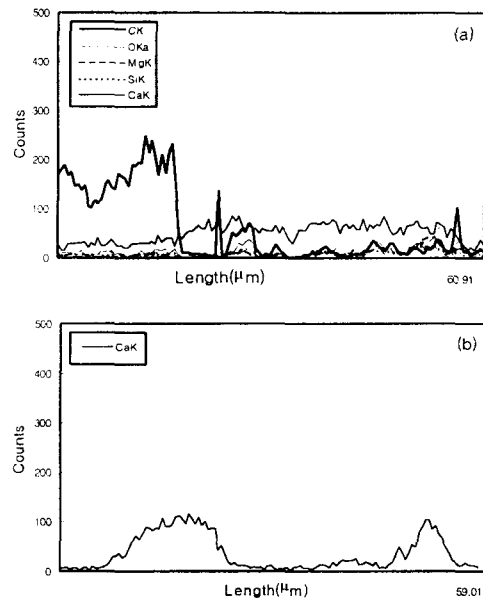


Fig. 5 Spectra of energy dispersive x-ray spectroscopy of phenol resin (a) graphite, (b) outside fire

짧은 시간에 절연재료의 열특성을 추정하는 시험법으로 열시차분석이 이용되고 있다. 이 방법은 일정한 속도로 온도를 변화시키기에 따라 물질의 물리적, 화학적 변화로 인한 열적 특성 변화를 알아낼 수 있다.

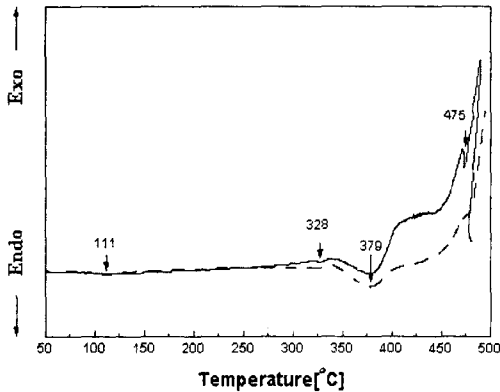


Fig. 6 Differential thermal analysis of insulator

Fig. 6은 차단기 내부에 사용되는 고무절연물의 온도의존성을 나타낸 것이다. 점선은 비열 처리한 절연물을 나타냈으며, 실선은 100°C에서 48hr. 열처리(thermal treatment; TT)한 것이다. 두 경우 온도 상승에 따른 열반응 특성은 큰 차이가 없으나 379°C를 기준으로 열에너지를 장시간 받은 절연물이 그렇지 않은 절연물보다 상대적으로 반응에너지가 낮음을 알 수 있다. 이것은 장시간 열에 노출되어 절연물의 경화에 의한 것이다<sup>15)</sup>. 그러나 어떤 원인으로 내부의 절연물인 고무가 착화되었을 때 지속적인 연소로 이어졌으며 이는 연속적인 출화의 주된 요인이 될 수 있다. 이런 것들을 종합해 볼 때 내부 배선 역시 난연재료를 사용함으로써 전기화재 발생의 가능성을 줄일 수 있다.

#### 4. 결 론

저압에서 많이 사용하는 저압용 전류동작형 電子式 열동형 과부하검용 RCD에 대해서 누전 차단기시험기, 주사전자현미경, 에너지분산 X선 분광분석기 및 DTA 등을 이용하여 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 접지저항에 따른 차단특성을 분석한 결과 2,500Ω 이상의 접지저항에서 RCD는 본래의 기능을 발휘하지 못하므로 적절한 접지저항을 유지해야 한다.
- 2) RCD의 1차측과 2차측을 역접속한 경우 정격 전압보다 낮은 전압이 인가되면 차단기가 동작되지 않음으로 점검이나 보수시 회로결선에 각별한 주의가 요구된다.
- 3) 화재가 발생하여 차단기 외부 케이스가 손상을 입었을 경우 누전차단기를 수직방향으로 놓았을 때 작동핀(금속)의 위치에 따라 전원의 ON/OFF 상태를 판별할 수 있다.
- 4) SEM에 의한 탄화물의 조직분석을 통해서 극간의 미소방전에 의한 그라파이트의 상장을 확인할 수 있었고, 전기화재의 원인을 규명할 수 있는 중요한 근거가 된다.
- 5) 차단기 내부의 고무절연물의 온도 의존성 분석을 통해서 절연물의 흡열반응 및 발열반응 온도를 알 수 있었다. 또한, 에너지원이 차단되어도 지속적인 연소가 된 것으로 보아 초기착화만 이루어지면 재해로 진전될 수 있다. 따라서 내부배선에 난연재료를 사용하면 재해발생 가능성을 낮출 것으로 사료된다.

#### 참 고 문 헌

- 1) 한국전기안전공사, "전기재해통계분석", pp. 7~16, 1997.
- 2) Kurt Nowak, "Zwanzig Jahre FI-Schutzschaltung Chronologie und Entwicklung varianten", pp. 7~9, 1978.
- 3) A.W. Smoot, N. Magan, "Method of Calculating electrical body impedance and equipment for measuring leakage currents", Underwriters Laboratories, USA, p. 298, 1985.
- 4) Koepfen, "Electrounfälle und ihre Einflußgrößen aus medizinischer Sicht", Heft 6, Seite 168 bis 173, 1966.
- 5) Walter F.Hart, P.E., "A Five-part Resistor-Capacitor Network for measurement of Voltage and Current Levels Related to Electric Shock and Burns", Electrical Sh-

- ock Safety Criteria, pp. 183~190, 1985.
- 6) Bruce V. Ettlign, "Electrical Wiring in Building Fires", Fire Technology, Vol. 14, No. 4, pp. 317~325, 1978.
  - 7) D.W. Levinson, "Copper Metallurgy as a Diagnostic Tool for Analysis of the Origin of Building Fires", Fire Technology, Vol. 19, No. 1, pp. 211~222, 1983.
  - 8) 한국산업규격(KS C 4613), 한국표준협회, 1994.
  - 9) 電氣設備の技術基準とその解釋, 日本電氣協會, 1997.
  - 10) National Electrical Code, Sec. 11, 10A, 384, 690, National Fire Protection Association, 1996.
  - 11) National Electrical Code Handbook, National Fire Protection Association, 1996.
  - 12) The Board of Verband Deutscher Elektrotechniker, DIN VDE-0100, Germany, 1989.
  - 13) 電氣と工事, 株式會社オーム社, pp. 42~43, 1991.
  - 14) 能登 文敏 外1人, "紙基材フェノール樹脂のトラッキングにおける溶出金屬の影響", 電氣學會論文誌A 98卷 5號, pp. 41~47, 1978.
  - 15) 大津留 修, "塩ビニル系樹脂の赤外吸收スペクトル", 科學警察研究所報告法科學編, Vol. 40, No. 2, pp. 31~37, 1987.
-