

저압용 누전차단기의 스위칭에 따른 아크 비산 및 접점의 특성분석

(The analysis of arc dispersion and contacts characteristics according to switching of RCD for low voltage)

김동우 · 김향곤 · 길형준 · 한운기 · 최충석

(Kim Dong-Woo · Kim Hyang-Kon · Gil Hyung-Jun · Han Woon-Ki · Choi Chung-seog)

한국전기안전공사 부설 전기안전연구원

(Electrical Safety Research Institute, Korea Electrical Safety Corporation)

Abstract

The arc dispersion and contacts characteristics were analyzed according to switching off Residual Current Protective Device(RCD) switch. Arc dispersion process was taken by high speed imaging system at a rate of 10,000 frames per second. When RCD was switched from on to off, arc was observed and it took about 2.3[ms] from the generation of arc to the extinction of arc. When RCD was switched from off to on, arc was not observed. We repeated switching on and off 1000, 3000 and 6000 times. After repetition, the surface characteristics of contacts were taken by stereo microscope and Scanning Electron Microscope(SEM). From the scattering patterns analysis of arc and the analysis of deteriorated contacts, it could be applicable to the research of electric fire and arc suppression.

1. 서론

전기화재 발생원인은 단락, 과부하, 누전, 접촉 불량 등 다양한 형태로 나타나고 있으나 원인 분석이나 이론적 정립은 미미한 실정이다[1-2]. 저압용 전기설비 접속부에서 발생하는 접촉불량에 의한 전기화재의 원인들을 보면 단자대 나사의 조임불량, 전선과 전선의 연결상태 불량, 접속기기류(콘센트, 플러그, 스위치 등) 접촉면의 먼지, 부식, 스프링 이완 등이 있다. 이러한 다양한 사고패턴의 중요 요소는 접촉불량에 따라 접촉저항이 발생하고 저항요소에 의한 열적 영향이 확산된다. 접촉저항은 집중저항과 경계저항으로 분류할 수 있으며 열적영향에 의해 경계저항이 집중저항을 중심으로 증가하는 관계를 가진다. 따라서 집중저항과 경계저항의 발생 메커니즘에 의한 화재해석과 원인규명을 위한 근원적 접근은 매우 중요하다[1-7].

본 논문에서는 전기접속기구의 스위치 접점부분 중 누전차단기의 스위치 On-Off시 접점의 아크발생 특성을 해석하고 아크발생 과정을 고속카메라를 이용하여 분석하였다.

2. 아크의 특성

아크란 두 개의 전극 사이에 존재하는 기체가 전압강하에 의해 전기적으로 방전되어 전류가 흐르는 것을 나타내며, 두 전극 사이에는 주울열이 발생한다. 이렇게 발생한 주울열은 발화점 이상의 높은 열을 발생시키고 이러한 열은 전기화재의 원인이 된다[8-9]. 두 개의 전극사이에 존재하는 기체는 전기적으로 전도되기 충분한 온도를 유지하며 분자들은 아크 내에서 충분한 온도를 유지하며 분자들은 아크 내에서 전체적으로 또는 부분적으로 해리가 되어, 원자들은 다시 이온화가 된다. 아크는 전자가 한 전극에서 다른 전극으로 흘러들어가는 구조로 되어 있으며 아크는 전극(도선)의 종류, 단면적, 전류, 전압의 크기에 따라 온도와 기하학적 특성이 변한다. 아크는 그림 1과 같이 아크주, 음극영역, 양극영역의 3가지 영역으로 구분할 수 있다. 아크주(arc column)의 전위경도는 아크 전류에 관계되고 아크주의 단면적은 전위경도가 가능한 가장 적은 값을 가지려는 방향으로 수렴된다[10]. 아크주의 전위경도는 아크 장치의 형태에 따라 변할 수 있다. 비록 실제적으로 아크내의 전류가 전자기동에 의해 발생하지만 전자전하와 이온전하의 수가 서로 같아 전하평형상태를 구성하기 때문에 아크주의 공간전하량이 실제 영이다. 아크주의 최대온도는 소호매질에 따라 다르지만 약 3,000-25,000[K]이다.

음극, 양극영역은 접점영역이라고도 하며, 이 영역은 접점으로부터 도전율이 일정하지 않은 가스로 전류가 이동하고 실제 접점의 도전율은 온도에 따라 조금 변하지만 일정하다고 볼 수 있다. 이 영역의 특성은 접점의 매질이나 소호매질에 밀접한 관계를 갖고 있다. 이 전자는 전계내로 투입되어 중성입자가 이온화 될 수 있는 충분한 에너지를 흡수할 때까지 가속된다.

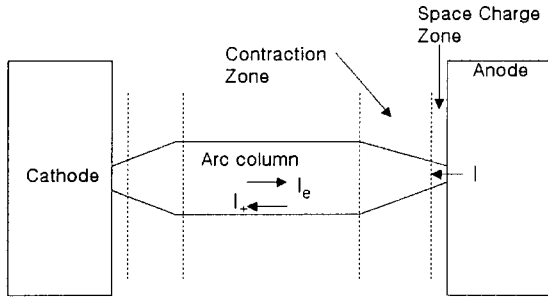


그림 1. 아크의 개략도
Fig. 1. Schematic of an arc

3. 실험방법

스위치 On-Off시 접점의 아크 발생 패턴 분석을 위해 그림 2와 같이 실험장치를 구성하였다. 실험에 사용된 누전차단기는 정격전압 220[V], 정격전류 30[A], 정격감도전류 30[mA], 단상 2선식의 누전·과부하 겸용이며, 단상 220[V]의 60[Hz]의 전원을 사용하였다. 실험시 부하측 조건은 전구부하 1개(220V, 60W)와 전열부하 2개(220V, 950W)를 병렬로 연결하였으며 누전차단기의 스위칭시 아크의 비산과정은 고속카메라(High Speed Imaging System, HG-100K, redlake, USA)를 이용하여 10,000 [frames/sec]으로 촬영하였다.

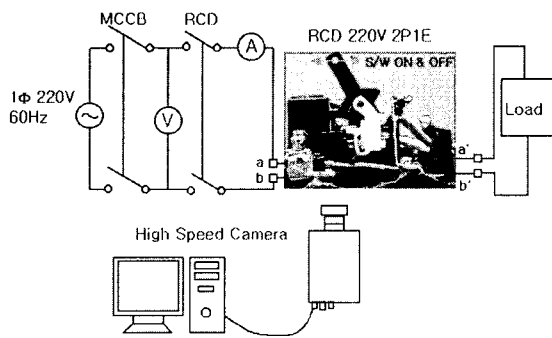


그림 2. 실험개략도
Fig. 2. Schematic of experiment

또한 반복시험 개폐기를 이용하여 1000회, 3000회, 6000회의 스위칭 On-Off를 반복한 후 접점부분의 표면 구조 변화를 실체현미경(SV-11, Carlzeiss, Germany)과 주사전자현미경(SEM, JSM-6400, Jeol, Japan)으로 분석하였다.

4 실험결과 및 고찰

일반적으로 개폐기의 접점은 주로 개폐시의 아크에 의해서 소모 및 손상이 크므로 접점재료로는 내산화성이 좋고, 전기전도도가 좋은 은이 많이 이용된다. 그러나 여러요인에 의해서 접점이 열화되었을 경우 전기제해의 위험성이 높아진다. 그림 3은 실험에 사용된 누전차단기의 스위치 On-Off시 접점부의 밀착 정도를 분석한 것이다. 그림 3(b)는 고정접점과 가동접점이 완전히 맞물리지 못하고 일부만이 접촉되고 있어서 과열이나 스위칭시 전기제해의 위험성이 있음을 알 수 있다.

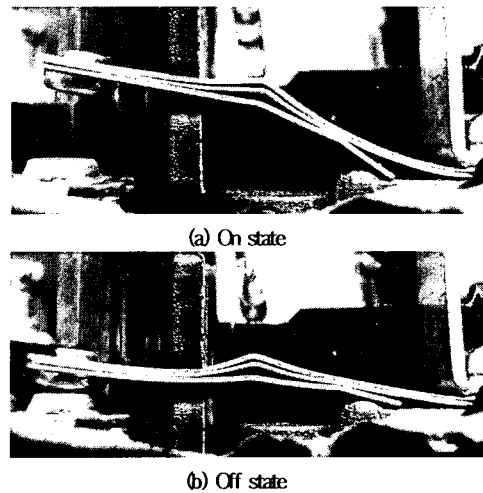


그림 3. 누전차단기 스위칭 On-Off시 접점의 특성
Fig. 3. The characteristics of RCD contacts during On-Off

그림 4은 정상 누전차단기의 스위치 OFF시 아크의 생성 및 소멸과정을 고속카메라로 촬영한 사진이다. 그림 4(a)는 스위치 OFF후 아크가 발생하기 직전을 나타내고 있다. 그림 4(b)는 아크가 발생하기 시작했을 때의 사진이며, 그림 4(b)~4(n)은 각각 0.2[ms]의 간격으로 전극간 접점이 벌어짐에 따른 아크 특성을 나타내고 있다. 그림 4(l)과 (m)에서는 아크가 점차 소멸되어가고 있음을 나타내고 있다. 아크가 최종 형성이 되어 완전히 소멸되기까지 약 2.3[ms]가 소요됨을 확인하였다.

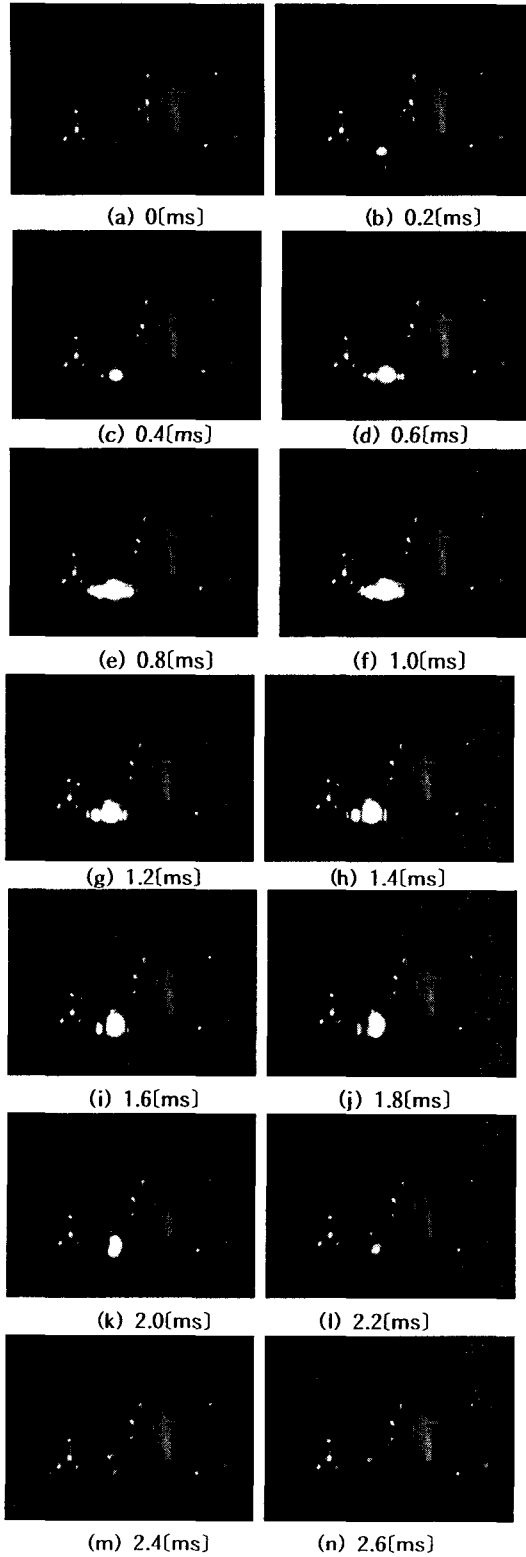


그림 4. 스위치 off시 접점간 아크 비산특성
 Fig. 4. Arc dispersion characteristics between contacts during switching off

그림 5에서 8은 반복 스위칭에 따른 접점부(가동접점, 고정접점)의 열화특성분석을 위해 0번, 1000번, 3000번, 6000번의 스위치 On-Off를 시킨 후 접점 표면구조 변화를 실체현미경과 SEM으로 확대 분석한 사진이다. 그림 5는 반복 스위칭을 하기 전의 표면조직을 나타내고 있다. 그림 6은 1000번의 스위치 On-Off한 접점부위로 반복스위칭에 따라 접점부위는 산화되었으며((a), (b), 실체사진) 입자가 크고 불규칙한 형태를 볼 수 있다((c), (d), SEM사진). 그림 7은 3000번의 스위치 On-Off한 접점부위로 접점부위는 탄화가 계속 진행되었으며(실체사진), 입자의 크기가 줄어들고 있음을 알 수 있다(SEM사진). 그림 8은 6000번으로 아크에 의해 표면이 심하게 그을렸으며(실체사진), 입자의 굴곡이 선명해지면서 입자의 크기가 줄어들고 있음을 확인할 수 있다(SEM사진).

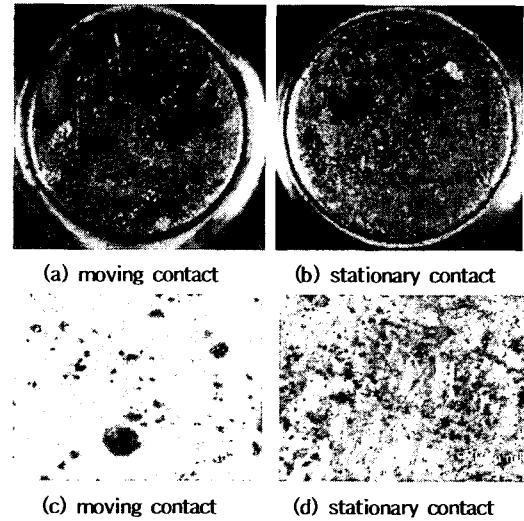
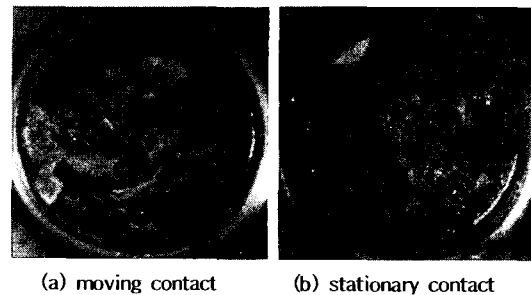
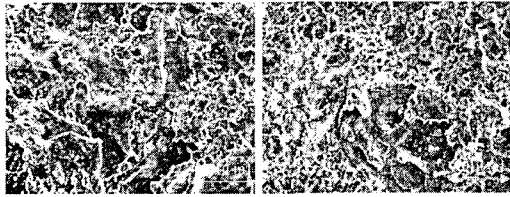


그림 5. 누전차단기 접점의 실체사진((a),(b)) 및 SEM사진((c),(d)) (접점의 직경: 4[mm], S/W회수: 0)
 Fig. 5. Stereoscopic images((a), (b)) and SEM((c), (d)) images of RCD contacts (diameter of contacts : 4[mm], number of switching: 0)

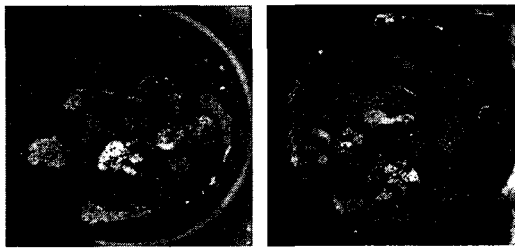


(a) moving contact (b) stationary contact

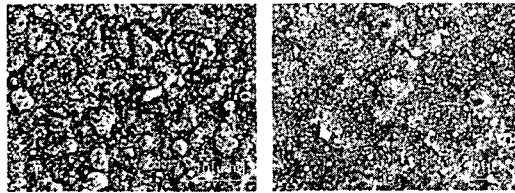


(c) moving contact (d) stationary contact

그림 6. 누전차단기 접점의 실제사진((a),(b)) 및 SEM사진((c),(d)) (접점의 직경: 4[mm], S/W회수: 1000)
 Fig. 6. Stereoscopic images((a), (b)) and SEM((c), (d)) images of RCD contacts (diameter of contacts : 4[mm], number of switching: 1000)

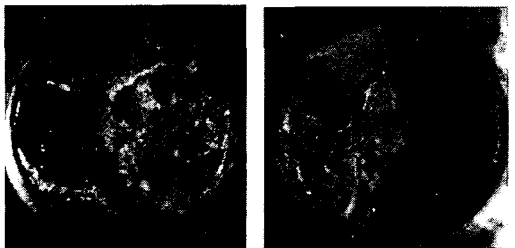


(a) moving contact (b) stationary contact

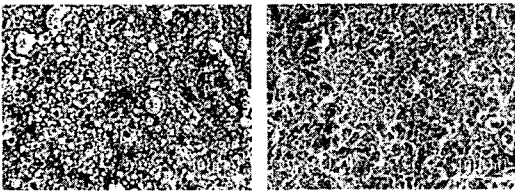


(c) moving contact (d) stationary contact

그림 7. 누전차단기 접점의 실제사진((a),(b)) 및 SEM사진((c),(d)) (접점의 직경: 4[mm], S/W회수: 3000)
 Fig. 7. Stereoscopic images((a), (b)) and SEM((c), (d)) images of RCD contacts (diameter of contacts : 4[mm], number of switching: 3000)



(a) moving contact (b) stationary contact



(c) moving contact (d) stationary contact

그림 8. 누전차단기 접점의 실제사진((a),(b)) 및 SEM사진((c),(d)) (접점의 직경: 4[mm], S/W회수: 6000)
 Fig. 8. Stereoscopic images((a), (b)) and SEM((c), (d)) images of RCD contacts (diameter of contacts : 4[mm], number of switching: 6000)

표 1. 반복스위칭에 따른 EDX분석

Table. 1 EDX analysis according to switching repetition

| 성분(%) s/w 회수 | C | Cu | Ag | O | 계 |
|-----------------|------|------|-------|-------|-----|
| 0 | 2.15 | 1.76 | 96.09 | - | 100 |
| 1000 | - | - | 85.98 | 14.02 | 100 |
| 3000 | - | - | 82.13 | 17.87 | 100 |
| 6000 | - | - | 84.60 | 15.40 | 100 |

표 1은 그림 5-8에 나타난 접점에 대한 반복스위칭에 따른 EDX(Energy Dispersive X-ray Spectrometer, Ultracool, Oxford, England)로 성분을 분석한 것이다.

스위칭 이전의 정상상태에서는 은(Ag)성분이 96.09%로 대부분을 차지하였다. 1000회 반복하였을 때는 은성분이 85.98[%]로 정상상태보다 약간 줄어들고 주위산소와 반응해서 산소성분이 14.02[%] 검출되었다. 3000회와 6000회 반복하였을 때는 1000회 반복하였을 때와 비슷한 비율로 성분이 검출되었다. 이를 통해 접점 표면에서 산화가 일어남을 알 수 있었다.

5. 결론

전기접속기구 중 누전차단기의 스위치 On-Off시 접점부위의 동작특성, 아크발생 특성 및 반복스위칭에 따른 열화특성 등을 실험한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 스위치 On-Off시 내부 접점 부분을 분석한 결과 스위치 On시에 차단기의 고정접점과 이동접점이 완전히 접촉되지 못하고 일부만이 접촉되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 이는 차단기 스위치 접점에 집중저항의 증가에 의한 전기재해 위험성이 있음을 알 수 있다.

2) 초고속카메라에 의한 접점부위 아크의 비산특성 분석결과, On에서 Off로 스위칭시 아크는 뚜렷이 관측되었으며 스위칭시 아크는 약 2.3[ms]간 관측되었다.

3) 스위치 On-Off 반복에 따른 차단기 접점부분의 표면구조분석결과, 반복 회수가 증가함에 따라 표면이 산화되어가고 있었으며, 1000회 스위치 On-Off한 입자는 크고 불규칙한 형태를 보였으나 3000회와 6000회의

경우는 입자의 굴곡이 선명해지면서 입자의 크기가 줄어드는 형태를 확인할 수 있었다.

4) 스위치 On-Off 반복에 따른 접점의 EDX 성분분석결과, 스위치 On-Off 이전의 접점에서는 C, Cu, Ag 등이 검출되었으며, 1000회, 3000회, 6000회의 스위치 On-Off 후 접점에서는 Ag와 O가 주로 검출되었다.

이상의 실험과 분석결과, 스위치 On에서 Off로의 아크 최소화를 위해서는 접점부분이 구조적으로 완전히 접촉하도록 설계되어야 하며, 차단기 단자를 통해서 먼지나 수분 등이 유입되지 않도록 구조나 형태를 개선해야 한다. 또한, 차단기 내부부품들은 불에 잘 타는 재질로 가혹한 조건하에서 차단기가 열화되었을 경우 아크에 의한 화재 확산 가능성이 있으므로 이들 부품들에 대한 난연화가 요구된다.

본 연구는 산업자원부 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] 최충석 외 5, "전기화재공학", 동화기술, pp. 189~198, 2004.
- [2] 한국전기안전공사, "전기재해 통계분석", pp. 7~12, 2003.
- [3] C. S. Choi, et al, "The Analysis of Dendrite Structure of Electric Wire Melted by Fusing Current", 2003 J-K Symp. on ED and HVE, pp. 145~148, 2003.
- [4] Ming Sun, et. al, "Lifetime Resistance Model of Bare Metal Electrical Contacts", IEEE Trans. on advanced packaging, Vol. 22, No. 1, Feb., pp. 60~67, 1999.
- [5] J. H. Dymond, Nick Stranges and Karim Younsi and John E. Hayward, "Stator Winding Failures: Contamination, Surface Discharge, Tracking", IEEE Tran. Industry Applications, Vol. 38, No. 2, pp. 577~583, March/April 2002.
- [6] H. Nakano, "Consideration of Fire Cause from Electrical Wiring", Japan Association for Fire Sci. & Eng., Vol. 46, No. 2, pp. 1~5, 1996.
- [7] Roland S. Timsit, "A Possible Degeneration Mechanism in Stationary Electrical Contacts", IEEE Trans. on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, Vol. 13, No. 1, March, pp. 65~68, 1990.
- [8] 반기중, 김낙교, "아크 전류 차단을 위한 제어알고리즘 개발", 대한전기학회논문지, 53D권, 3호, 2004.3.
- [9] 한국전기연구소, "개폐장치 설계기술 개발을 위한 대전류 아크 특성에 관한 연구", 1991.7.
- [10] 이세현, "아크용접에 있어서의 아크의 특성과 응용", 대한용접학회, 제 10권, 1호, 1992.3