

# 저압용 누전차단기 접속부의 발열 및 금속 조직 분석에 관한 연구 A Study on the Analysis of Heat and Metallurgical Structure of Connection Parts for Residual Current Protective Devices

최충석<sup>†</sup> · 송길목 · 김동욱 · 김동우 · 김영석

Chung-Seog Choi<sup>†</sup> · Kil-Mok Shong · Dong-Ook Kim · Dong-Woo Kim · Young-Seok Kim

전기안전연구원(한국전기안전공사 부설)  
(2004. 9. 15. 접수/2004. 11. 22. 채택)

## 요 약

본 연구에서는 저압용 누전차단기 접속단자에서의 접촉압력에 따른 발열특성을 조사하고 차단기 단자와 전선에 접촉 불량 발생했을 때의 전압, 전류파형과 산화물 증식 등을 분석하였다. 차단기 단자와 전선에 접촉압력이 가해지지 않았을 때는 접촉저항증가로 열이 발생하고 금속표면에 산화막이 형성되었다. 이때 단자 외부 절연물의 온도는 접촉 불량에 의해 급격하게 상승하며 단자내부에서 미세한 불꽃과 연속적인 방전음이 발생하였다. 단자내부도체와 접속전선 접촉면에서 기계적 진동에 의한 접촉 불량이 발생했을 때, 접촉면에서 산화물이 증식되고 발열온도는 869°C 이상으로 상승하여 전기재해의 위험이 높음을 알 수 있었다.

## ABSTRACT

We investigated heat properties of connection terminal in residual current protective devices(RCD) according to contact pressure for low voltage appliance. And we analyzed voltage and current waveform and oxide propagation when the poor-contact happened between terminal and wire. When contact pressure between terminal and connection wire was not applied, the heat was generated and an oxide was formed on the surface of the wire. The temperature of the insulation surrounding terminal was ascended sharply by poor-contact, micro-sparks and continuous arc sound happened in interior terminal. When the poor-contact by vibration occurred inner conductor of terminal and wire, an oxide was propagated on contact surface and the temperature was increased at 869°C. Thus, we found that the risk of electrical disaster is high in terminal and connection wire parts.

**Keywords :** Terminal, Poor-contact, Heat, Oxidation propagation

## 1. 서 론

전기에너지 사용의 증가 및 전력 공급 형태의 변화에 따라 대용량 전기설비가 많이 보급되고 있으며 이들 전기설비 내에는 전선과 전선의 접속, 전선과 기기 단자의 접속 등 다수의 전기적 접속부가 존재한다. 접속부의 접속력이 현저하게 저하되거나 환경적 요인에 의해 열화되면 국부적인 발열로 인해 전기재해가 일어날 수 있으므로 이에 대한 연구가 필요하다.<sup>1-6)</sup>

저압용 전기설비에서 과부하나 누전에 의한 전기재

해를 예방하기 위해 배선용 차단기나 누전차단기가 사용되고 있으며 이들 차단기 단자와 전선의 접속은 볼트를 사용한 기계적 압력방식이 사용되고 있다. 기계적 압력에 의한 접속방식은 작업 시에 가한 압력에 의한 잔류응력으로 접속이 유지되기 때문에 일단 잔류응력이 없다면 접속성능이 현저하게 저하되어 국부적인 발열현상이 발생하고 이로 인해 전기재해를 유발하게 된다.<sup>7-10)</sup>

본 연구에서는 저압용 누전차단기 단자에서의 접촉압력에 따른 발열특성과 차단기 단자부근 절연물의 온도변화를 측정하였으며, 정상상태의 단자와 접촉 불량이 발생한 단자의 외형을 비교하였다. 또한, 차단기 단

<sup>†</sup>E-mail: enetek@naver.com

자와 전선사이, 단자 내부도체와 전선 사이에서 접촉 불량이 발생했을 때 전압과 전류의 파형변화와 접촉면에서의 산화물 증식특성, 발열온도 및 소손 pattern을 분석하여 전기제해 예방 자료로 활용하고자 한다.

## 2. 실험방법

Fig. 1은 접촉압력에 따른 발열특성 실험을 위한 장치로 실험에 사용된 누전차단기는 누전·과부하 보호겸용(1 $\phi$ , 220 V, 30 A)이며, 차단기의 전원 측과 부하 측에 600 V 비닐절연전선(IV) 2.0 mm를 접속하였다. 전원은 1 $\phi$  220[V] 60[Hz]를 사용하였으며 가변저항(V.R)을 이용하여 부하전류를 조절하였다.

전원측 양단자와 부하 측의 좌측단자의 나사 호칭은 M5로서 토크 드라이버(FDS2-S, Tohnichi, Japan)를 이용하여 Table 1에 나타낸 것과 같이 KS에 규정<sup>11)</sup>된 접촉압력으로 접속하였으며, 단자의 호칭과 토크는 단자 볼트의 지름과 토크힘을 나타낸다. 부하 측의 우측단자는 접촉압력 변화에 따른 단자의 발열특성을 분석하기 위해서 조임 토크를 가변시켰다. 발열특성은 적외선열화상분석기(IQ325, FL-IR, USA)를 이용하여 측정

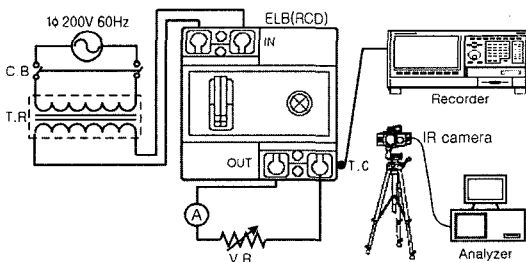


Fig. 1. Schematic of experimental setup.

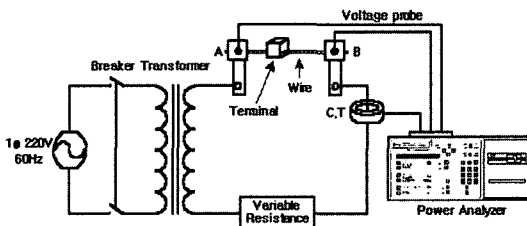


Fig. 2. Measurement circuit of voltage and current at terminal and wire.

Table 1. Tightness torque[KSC 4613]

단자나사 호칭	M3	M3.5	M4	M4.5	M5	M6	M8	M10
토크(kgf · cm)	5	8	12	15	20	25	55	75

하였으며, 단자부근 절연물의 온도변화는 Fig. 1과 같이 열전대(Thermocouple, J-type)와 기록계(AR1100A, Yokogawa, Japan)를 조합하여 온도를 실시간 측정, 기록하였다.

Fig. 2는 차단기 단자와 전선, 단자 내부도체와 전선 사이에서 접촉 불량이 발생할 때 전압과 전류파형 변화, 산화물 증식특성 등을 측정하기 위한 실험 장치이다. 차단기 단자는 철(Fe)에 니켈(Ni) 도금되었고 내부도체는 구리(Cu)와 아연(Zn)의 합금에 주석(Sn)을 도금한 것이다. 전선은 IV이며 두 도체 접촉면에서의 접촉 불량을 모의하기 위해 진동자(vibrator)를 이용하였으며, 접촉 불량 진행시 접촉면에서의 산화물 증식특성을 관찰하였다.

단자의 금속조직은 금속현미경(Epiphot Nikon, Japan)을 이용하여 정상단자와 접촉 불량된 단자를 비교하였으며, 정밀전력분석계(3030A, BMI, USA)와 적외선카메라(TR-630, Minolta, Japan)를 이용하여 단자와 전선 사이, 단자 내부도체와 전선 사이에서 접촉 불량이 발생했을 때 전압과 전류의 파형변화와 발열온도를 측정하였다. 또한 주사전자현미경(SEM; Scanning Electron Microscope, JSM-6400, Jeol, Japan)과 에너지분산형 X선분석기(EDX; Energy Dispersive X-ray Spectrometer, ISIS, Oxford, England)로 차단기 단자와 전선의 산화증식현상을 분석하였다.

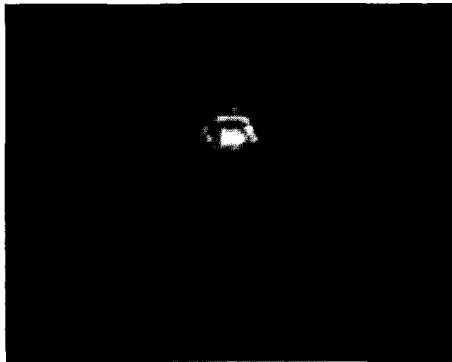
## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 차단기 단자의 발열특성

Fig. 3 (a)는 3A의 부하전류에서 차단기 단자의 접속 전선에 접촉압력이 가해지지 않았을 때(0 gf · cm)의 발열상황을 적외선열화상진단장비로 측정된 것으로 중앙부분이 180°C 이상 발열하였다. 이와 같이 고온으로 단자가 발열하게 되면 단자부근의 절연물이 탄화하게 된다. (b)는 정상상태의 단자 외형으로 흰색을 띄고 있으며 약간의 광택이 보인다. (c)는 접촉 불량이 발생한 단자로 표면에 산화피막이 형성되어 흑회색을 띄며 광택은 보이지 않았다.

### 3.2 단자부 절연물의 온도변화

Fig. 4는 3A 전류가 흐르고 있을 때 접촉압력 변화



(a) IR image of heat generation



(b) normal



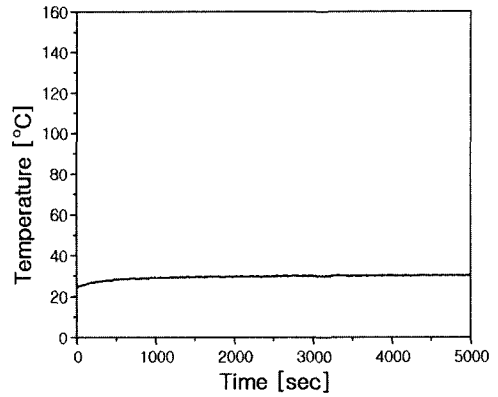
(c) poor contact

Fig. 3. Heat generation and appearance of terminal.

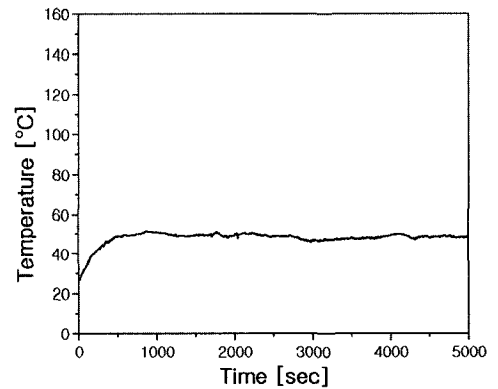
에 따른 차단기 부하측 우측단자 부근 절연물의 온도 변화를 열전대와 기록계를 이용하여 5,000 sec 동안 측정 한 것이다. (a)는 200 gf·cm일 때의 온도변화로 최고 30.5°C까지 상승하였으며, (b)는 50 gf·cm일 때의 온도변화로 51.5°C까지 온도가 상승하였다. (c)는 단자와 전선 사이에 접촉압력이 가해지지 않았을 때(0 gf·cm)의 온도변화로 급격하게 온도가 상승하여 158.8°C를 나타냈다. 접촉 불량시 진행되는 동안 단자 내부에서 미세한 불꽃과 반복적인 소리가 발생하였다.

### 3.3 접촉 불량시 전력 파형

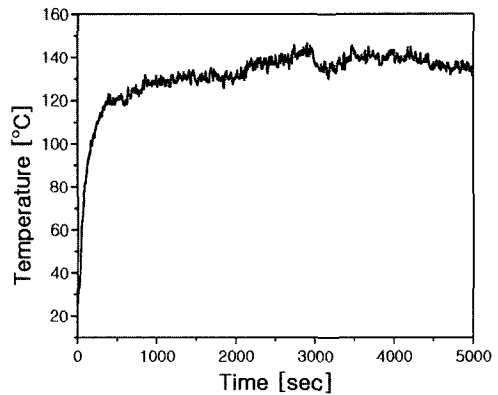
Fig. 5의 (a)와 (b)는 차단기 단자와 전선의 정상상태와 접촉 불량된 상태를 나타내며, Fig. 6의 (a)와 (b)는 단자내부도체와 전선의 정상상태와 접촉 불량된 상태를 나타낸다. Fig. 5 및 Fig. 6에서와 같이 진동에 의해 접촉 불량 상태가 되면, 초기에 파란 불꽃이 연속적으로 방전되고, 일정 시간이 경과하면 황색의 불꽃이 발생하여 산화물이 증식되며 접촉된 전선 도체를 용융시키는 높은 온도로 발열하기 때문에 주변에 가연물이 존재할 경우, 재해로 이어질 가능성이 높음을 알



(a) 200 gf·cm



(b) 50 gf·cm

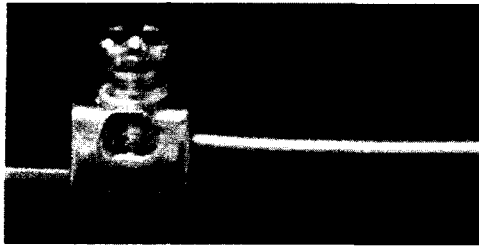


(c) 0 gf·cm

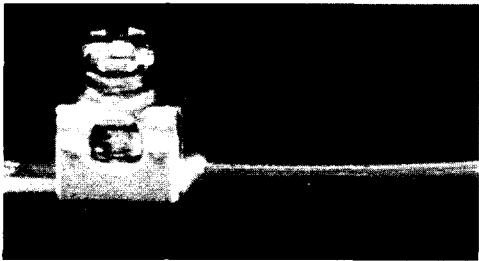
Fig. 4. Temperature of insulation around the terminal.

수 있었다.

Fig. 7은 Fig. 5(b)와 같이 차단기 단자와 전선 사이에서 접촉 불량이 발생했을 때 Fig. 2의 A-B 사이의 전압과 전류의 파형변화를 측정한 것이다. (a)는 단자

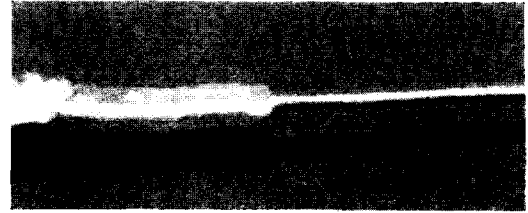


(a) Normal

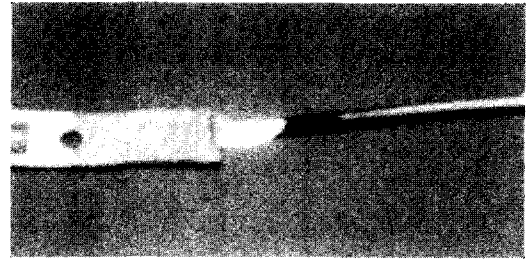


(b) Poor contact

Fig. 5. Conditions of contact of the terminal and wire.

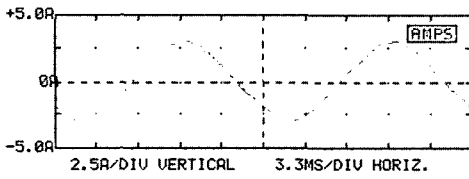


(a) Normal

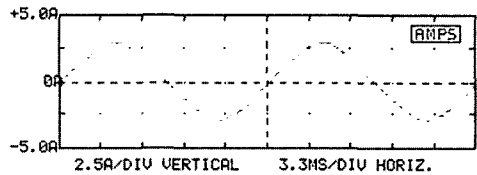


(b) Poor contact

Fig. 6. Conditions of contact of the inner conductor of terminal and wire.



(a) Initial stage of poor contact



(b) The generation of yellow spark

Fig. 7. Voltage and current waveform between terminal and wire.

와 전선을 서로 접촉했을 때로 전류( $I_{rms}$ )는 2.10 A의 정현파가 나타났으며, 전압( $V_{rms}$ )은 0.3 V의 미세한 펄스파가 나타났다. (b)는 접촉면에서 황색불꽃이 나타날 때로 전류는 2.04 A의 정현파가 나타났으며, 전압은 2.6 V의 구형파가 나타났다. 단자와 전선 접촉면에서 구형파 발생시에는 산화물 증식이 일어났으며, 차단기 단자에는 진동시에 발생한 spark에 의해 침식현상이 나타났다.

Fig. 8은 Fig. 6의 (b)와 같이 단자 내부도체와 전선 사이에서 접촉 불량 발생했을 때 Fig. 2의 A-B 사이

의 전압과 전류의 파형변화를 나타낸 것이다. (a)는 단자 내부도체와 전선을 접촉했을 때로 전류는 2.06 A의 정현파가 나타났으며, 전압은 0.4 V의 미세한 펄스파가 나타났다. (b)는 접촉면에서 산화물이 증식될 때로 전류는 2.02 A의 정현파가 나타났으며, 전압은 5.9 V의 펄스형태의 구형파가 나타났다. 이때의 발열온도를 적외선카메라로 측정한 결과( $\epsilon: 1.0$ ), 869°C를 나타냈으며 주위에 가연물이 접촉하고 있을 경우에는 전기재해가 발생할 위험이 높음을 알 수 있다. Fig. 7과 Fig. 8의 파형분석 결과는 접촉 불량에 의한 전기재해예방 보호

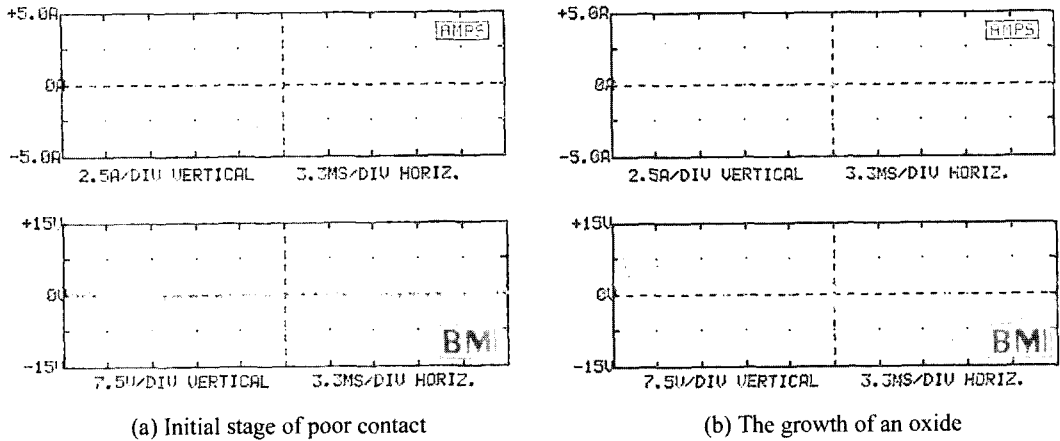


Fig. 8. Voltage and current waveform between inner conductor and wire.

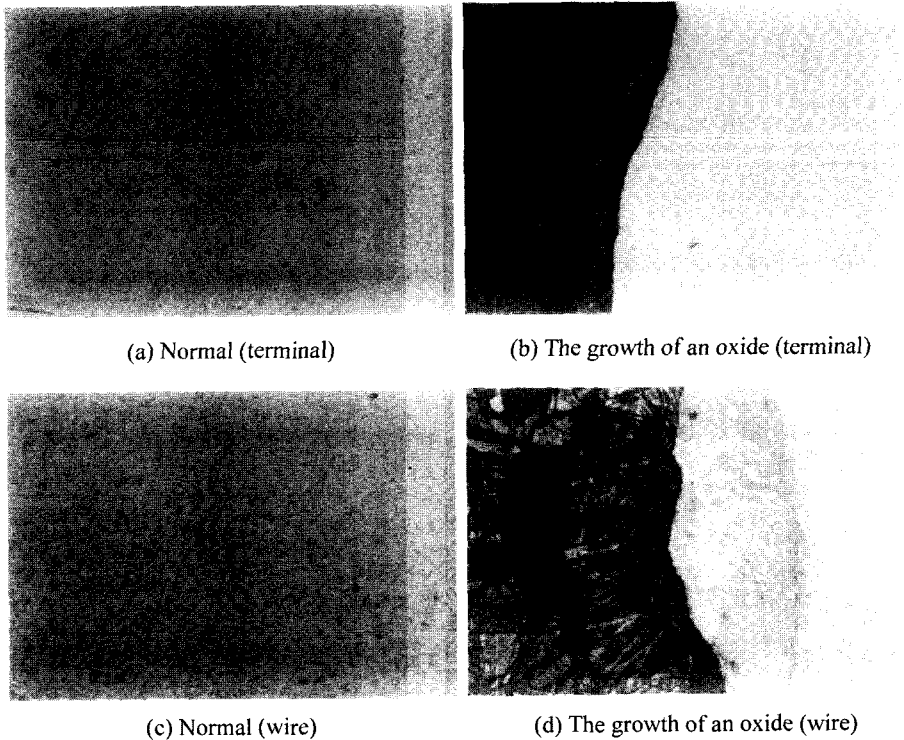


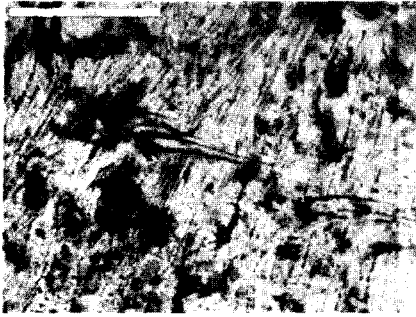
Fig. 9. Metallurgical picture of terminal and wire.

장치 개발에 중요한 자료로 이용될 수 있을 것이다.

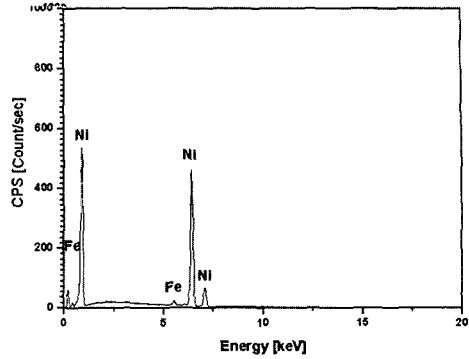
Fig. 9(a)~(d)는 차단기 단자와 전선 접촉면의 금속조직을 금속현미경으로 100배 확대하여 관찰한 것이다. 그림 (a)와 (c)는 정상일 때의 단자 및 전선으로 연신 구조를 나타내고 있으며, 그림 (b)와 (d)는 접촉 불량으로 산화물의 증식된 부분으로 금속고유의 조직은 사

라지고 산화된 부분은 다수의 크랙이 형성된 조직형태가 나타났다. 하지만, 금속조직으로 구성성분이 다른 단자 및 전선의 조직을 분석하는 것은 쉽지 않아 EDX로 조성변화를 분석하였다.

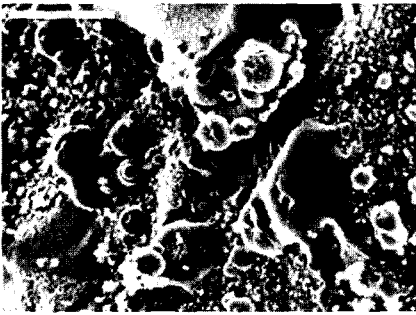
Fig. 10은 차단기 단자를 SEM과 EDX로 분석한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 10의 (a)와 (b)는 정상상태의



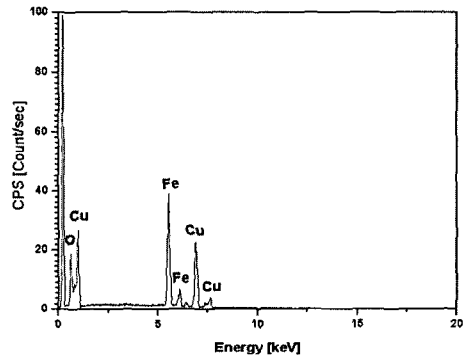
(a) SEM image of terminal (normal)



(b) EDX analysis of terminal (normal)

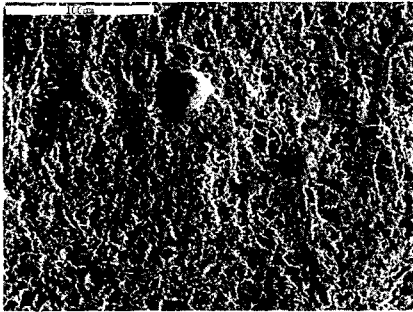


(c) SEM image of terminal (the growth of an oxide)

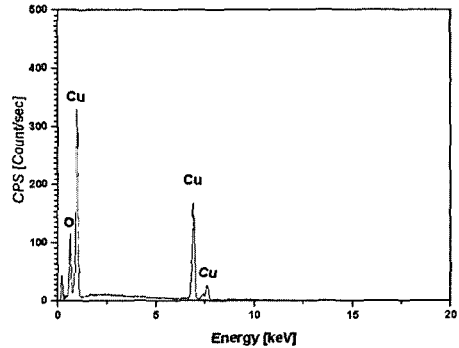


(d) EDX analysis of terminal (the growth of an oxide)

Fig. 10. SEM and EDX analysis of terminal.



(a) SEM analysis of wire (the growth of an oxide)



(b) EDX analysis of wire (the growth of an oxide)

Fig. 11. SEM and EDX analysis of wire.

차단기 단자로 철(Fe)에 니켈(Ni)이 도금 된 것을 알 수 있으며 표면은 연신구조를 나타내고 있으며 니켈성분(98%)이 검출되었다. 하지만, 그림 (c)와 (d) 같이 접촉 불량에 의해 산화물이 증식되면, 공기 중의 산소(O<sub>2</sub>)와 전선접속부의 구리(Cu)전선과 반응하여 표면의

니켈(Ni)은 반응에 의해 모두 사라지고 내부의 철과 구리가 각각 36%, 45% 차지하였으며, 산소는 약 17% 정도로 나타났다.

Fig. 11은 산화물이 증식된 구리 전선을 SEM과 EDX로 분석한 것이다. 정상적인 구리전선의 표면은 연신

구조를 나타내었고 구리성분이 검출되었으나, Fig. 11과 같이 산화물이 증식된 전선에서는 공기 중의 산소와 반응하여 산화물이 형성되어 구리(Cu)와 산소(O)가 검출되었다.

#### 4. 결 론

저압용 누전차단기 단자와 전선접속부의 접촉 불량에 따른 특성변화를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 차단기 단자의 발열은 접촉압력이 작아질수록 상승하였으며, 0 gf·cm, 3A전류에서는 온도가 180°C이상으로 나타났으며, 단자 주변 절연물의 온도도 158.8°C까지 상승하였다. 접촉 불량시에는 단자부분에서 미세한 불꽃과 반복적인 방전음이 발생하였다.

(2) 차단기 단자와 전선 사이에서 접촉 불량이 진행되면, 초기에는 파란불꽃의 방전이 연속으로 일어나고 일정 시간이 경과하면 황색의 불꽃이 발생하여 산화물이 증식되었다. 또한 초기 접촉시에 전압파형은 펄스파형 형태를 나타내고, 산화물이 증식될 때는 구형파가 나타났다. 이때의 발열온도를 측정한 결과, 869°C를 나타냈으며 전기제해의 위험이 매우 높음을 알 수 있었다.

(3) 차단기 단자와 전선 사이에 접촉 불량이 발생하면 공기 중의 산소와 접촉 전선과의 반응에 의해 표면에 도금된 니켈은 모두 사라지고 철(Fe)과 구리(Cu), 산소(O)가 검출되었다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원부 전력산업기반기금에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. 한국전기안전공사, “전기제해 통계분석”, pp10-50(2003).
2. 최충석, “전기화재공학”, 동화기술, pp195-265(2004).
3. 박용환, 양승용, “단면결합 전선에서의 화재발생메카니즘 연구”, 한국화재소방학회 추계학술대회 논문집, pp61-67(2001).
4. 김항곤 외 5, “접촉 압력에 따른 전선 연결기구의 열 특성 변화”, 한국화재소방학회 추계학술대회 논문집, pp127-132(2002).
5. 原 英喜 외 1, “一般家庭における低壓遮斷器接點の接觸抵抗とジュール熱”, J. IEIE Jan, 21(122), pp1031-1032(1995).
6. 東京消防廳消防科學研究室, “漏電遮斷器等の電線接續部からの出火防止する研究”, フユスク, pp46-50(2001).
7. Jarle sletbak, Roar Kristensen, Hakon Sundklakk, Gunnar Navik and Magne Runde, “Glowing Contact Areas in Loose Copper Wire Connections”, IEEE Trans. Comp., Hybrids, Manuf. Technol., 15(3), June. pp322-327(1992).
8. Guo-Ping Lue, Jian-Gue Lu, and Ji-Gao Zhang, “Failure Analysis on Bolt-type Power Connector's Application”, IEEE, pp77-86(1999).
9. Tamai, Aramata, “Safe Levels of Silicone Contamination for Electrical Contact”, Proceedings of the Thirty-Ninth IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, pp269-273(1993).
10. Maeda, Kinoshita, Yoshimura, Genma, “Effects of Joints on Contact Reliability in Miniature Precision Snap-acting Switches”, Proceedings of the Thirty-Sixth IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, pp358-369(1990).
11. 누전차단기 KS 규격(KS C 4613), 기술표준원(2003).