

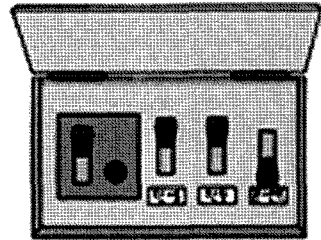
저압용 누전차단기 외함의 소손 원인 해석



최 중 석
전주대학교 소방안전공학과 교수

1. 서론

저압용 전기설비의 전기재해를 예방하는 기기로는 배선용 차단기(MCCB), 커버나이프스위치(CKS), 누전차단기(RCD 또는 ELB) 등이 주로 사용되고 있다. 배선용차단기는 회로에 과전류가 흐를 때 회로를 차단하는 역할을 하고, 누전차단기는 전기설비에 누전이 발생했을 때 인체의 감전보호를 목적으로 설치하는 것이다. 즉 전기설비에 누설전류가 흐르게 되며 절연물은 시간경과와 함께 온도, 습도, 절연물 표면의 오손 등에 의해 저항이 변화된다. 이때 절연물의 저항이 심하게 저하되면 누설전류 증가에 의해 사고가 발생되어 법정분쟁이 유발된다.



제조자와 사용자 간의 이해관계가 밀접한 내용이 제조물책임법(Product Liability)이다. 제조물책임법(PL)에 의하면, 제조물로 인해 소비자 피해가 발생할 경우 제조업자가 책임을 지게 하는 것으로, 소비자가 제조물의 결함으로 인한 피해 사실을 증명해야 하는 불합리에서 벗어나 제조업자가 제조물 결함이 아니라는 무과실 여부를 증명해야 한다는 것이다. 제조물책임법(PL)에 의하면 전기화재의 원인규명은 두 가지로 구분하여 분석이 이루어지는데 전기 시스템에 의한 원인 분석과 전기재료 분석에 의해 원인을 규명하는 것이다. 전기 시스템 분석의 경우 사고가 발생한 전기설비에 대해 부하용량을 산출한다든지 위험부위 노출에 따른 안전성, 관리, 규격등 복합 요소에 의한 평가가 이루어진다. 즉 설계 및 구조 결함인지, 취급불량인지, 공사결함인지, 정년열화인지, 그리고 그밖의 요인인지를 객관적 사실에 근거하여 판정하게 되는 것이다. 그런데 원인의 판결에 있어서 주의할 것은 추정이나 주변 목격자의 진술을 토대로 한 자료는 법적 공신력이나 과학적인 입증

자료로서 불충분하므로 시스템 분석과 더불어 과학적으로 뒷받침할 수 있는 탄화된 재료의 분석이 이루어져야 한다.

따라서 본 논고에서는 저압용 누전차단기의 외함 재료로 사용되고 있는 페놀수지의 탄화 특성을 소손 특성을 객관적으로 제시하기 위해 공인된 방법에 의해 재현실험을 실시하고 그 결과를 실체현미경, 초고속이미지시스템, 저항특성 등을 입체 분석하여 소손 원인을 판정할 수 있는 과학적 자료를 제시하는데 있다.

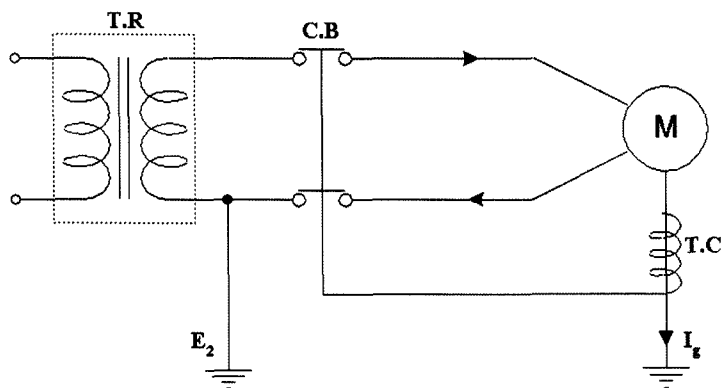
2. 관련이론

2.1 누전차단방식의 분류

누전차단기(RCD; Residual Current Protective Device or ELB; Earth Leakage Breaker)는 누전 검출방법에 따라 전압동작형(電壓動作形), 전류동작형(電流動作形), 전압전류동작형(電壓電流動作形) 등으로 분류된다.

(1) 전압동작형

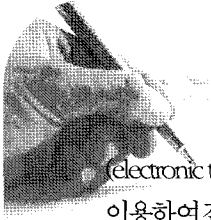
- 전기설비에 설치되어 있는 부하기기의 절연불량에 의해 전기설비가 충전되면 대지 사이에 접지선을 통하여 전위차가 발생하므로 이를 검출하여 차단기를 동작시키는 방식이다. 즉 전로의 중성점 또는 접지측 전로에 나타나는 영상전압 혹은 접촉전압을 검출하여 자동차단 하는 것이며 원리는 <그림 1>과 같다.



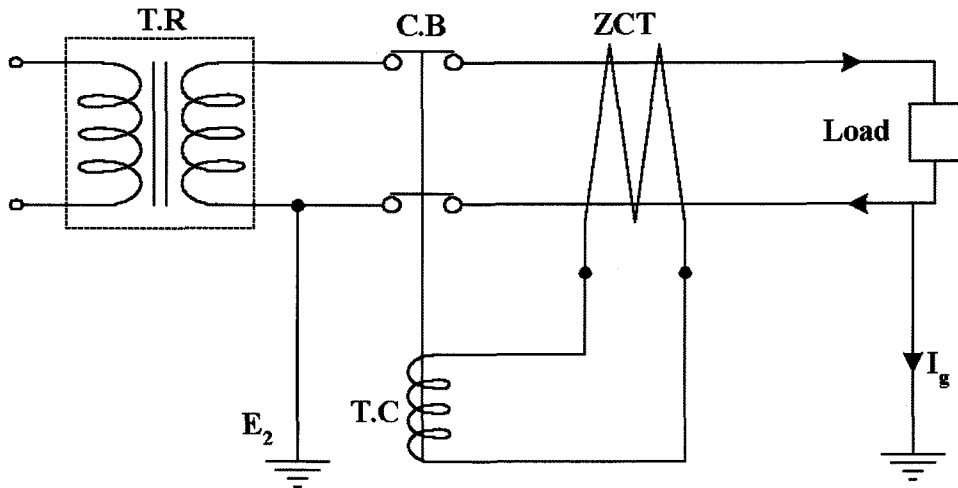
<그림 1> 직접식 전압동작형 누전차단기의 원리

(2) 전류동작형

- 누전차단기가 전기설비에 설치되었을 때 차단동작 방법에 따라 電磁式(electromagnetic type)과 電子式



(electronic type)으로 분류되며, 누설전류를 검출하는 영상변류기(ZCT; Zero Phase Current Transformer)를 이용하여 감전안전 한계에서 정해진 기준치와 비교하여 전로를 차단하는 방식이다. 이 방식은 계통의 연계가 쉽고 비용이 저렴하여 가장 보편적으로 채용하고 있으며, <그림 2>와 같은 회로로 구성된다.



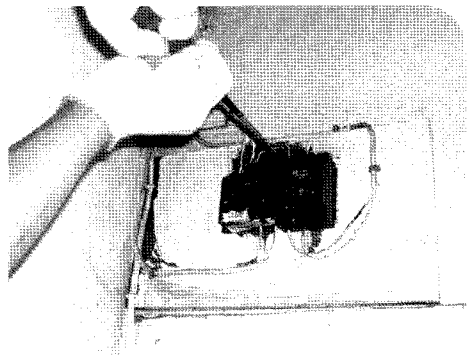
<그림 2> 분전반 내부에 설치된 차단기의 열 확산 패턴

(3) 전압전류동작형

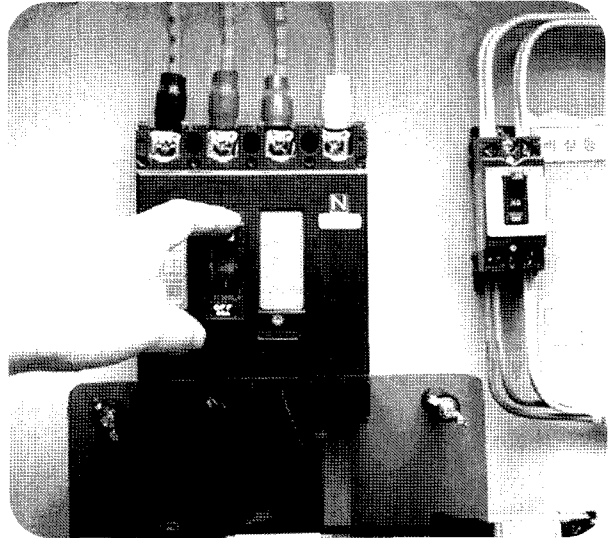
- 전기설비의 동일 계통 내에서 다회로(多回路)의 전로를 구분하여 보호하는 경우 또는 인체 감전의 위험성이 높은 시설의 경우에 전류동작형 및 전압동작형을 조합하여 지락회로를 선택 차단하는 것으로 비접지 또는 고저항 접지계통에 적용된다. 그러나 이 방식은 계통 연계의 복잡성과 비용이 비싸다는 이유로 제한적으로 사용된다.

2.2 페놀수지의 특성

전기기계기구에 사용되는 절연재료는 전기를 안전하게 사용하고 대상물을 적절히 보호하기 위해서 사용되며, 물리·화학적인 특성에 따라 무기재료와 유기재료로 분류된다. 무기재료는 절연성능이 우수하고 절연의 신뢰성이 높다는 장점을 갖고 있어서 대용량 설비, 고전압 및 대전력 설비에 폭넓게 사용되고 있다. 반면에 부피가 크고 제품과의 조화가 어렵다는 단점 때문에 소형 경량을 요구하는 전기기기에서



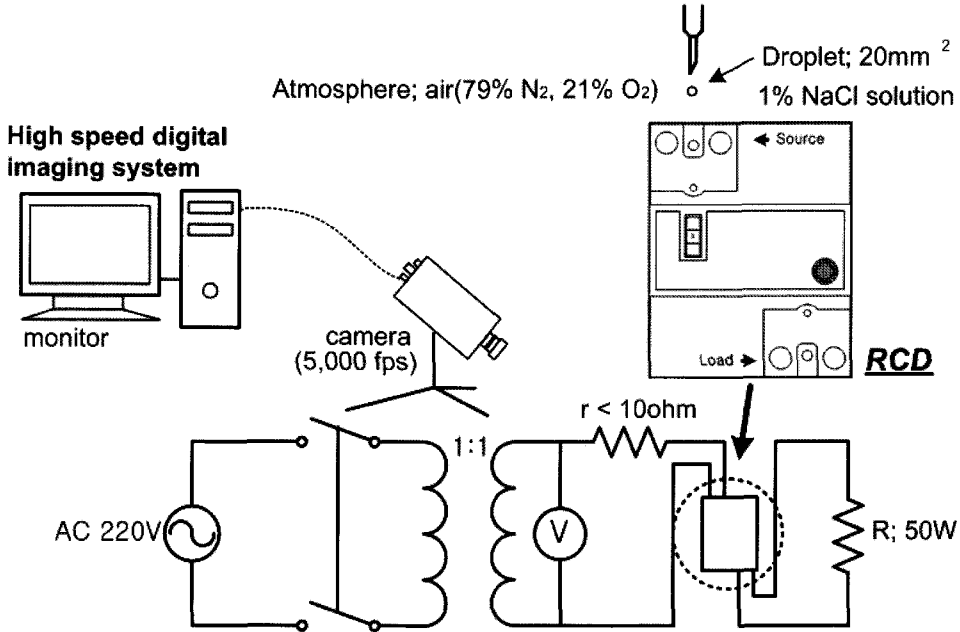
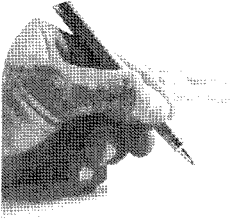
용의 폭이 좁아지고 있다. 유기재료는 가격이 싸고 설비 적용이 쉬우므로 소용량의 전기설비 기계 기구에 많이 응용되고 있다. 유기재료는 열 특성에 따라 열경화성 수지와 열가소성 수지로 분류된다. 열가소성 수지는 재활용이 가능한 수지이며, 열경화성 수지는 재활용이 불가능한 수지를 말하며 대표적인 재료가 페놀수지이다.



페놀수지(phenol resin)는 페놀류(석탄산, 크레졸)와 알데히드류(포르말린, 아세트알데히드)의 축합반응(2개 이상인 분자, 또는 동일 분자 내의 2개 이상의 부분이 새로운 결합을 만드는 반응)에 의해 얻어지는 것으로 석탄산수지 또는 베크라이트라고도 한다. 페놀수지는 일반적으로도료, 형조품, 적층품 등에 사용되며, 도료는 중간 축합물을 알코올 기타 용제로 녹인 것으로 페놀수지 바니시로 사용된다. 형조품은 중간 축합물을 주형에 흘려 넣어 그대로 축합을 진행한 것과 목재, 석면, 마이카 등을 혼합해서 가열압축 성형한 것이 있다. 적층품은 페놀수지 바니시를 종이, 천, 유리포 등에 도포하고 이것을 겹쳐서 가열압축한 것이다. 페놀수지는 페놀의 단량체(monomer)에 포름알데히드(formaldehyde)를 반응시켜 추출한 화합물이며, 결합 형태에 따라 노보락 페놀(novolak phenol)과 리졸형(resol type)으로 분류된다.

3. 실험 방법

전기설비에 적용된 누전차단기 및 누전경보기의 외함의 소손 원인 분석을 위한 실험은 국제전기위원회(IEC Publ. 112)에서 제안하는 방법을 응용하여 1%의 염수를 20초 간격(27방울/분)으로 누전차단기의 전원측 단자 사이에 주입하여 외함에서 화재가 발생할 때까지 진행하였다. 누전차단기 외함의 열적인 영향을 분석하기 위해 열분석기(DTA/TGA, SDT-2960, TA Ins., USA)를 이용하여 흡·발열반응과 열중량 변화를 분석하였다. 표면의 화학적 구조 변화를 분석하기 위해 적외선분광기(FT-IR, Spectrum GX, PerkinElmer Ins., USA)를 이용하였다. 재현 실험을 통해 얻은 분석 결과와 화재 현장에서 수거한 누전차단기의 분석 결과를 분석하여 상호 연관성을 규명하였다. <그림 3>은 220V, 60Hz가 인가된 상태에서 누설전류에 의해 표면방전이 발생할 수 있도록 회로를 구성한 개략도이다. 시스템 보호를 위해 저항을 각각 실험 대상의 직렬과 병렬로 연결하여 사용하였다. 표면방전이 시작될 때 시간에 따른 전류의 변화를 기록계(Analyzing recorder, AR1100A, Yokogawa, Japan)를 이용하여 측정하였고, 누전차단기 외함의 소손이 발생할 때의 파형을 오실로스코프(Digital oscilloscope, TDS 3052, Tektronix, USA)에 의해 측정하였다.

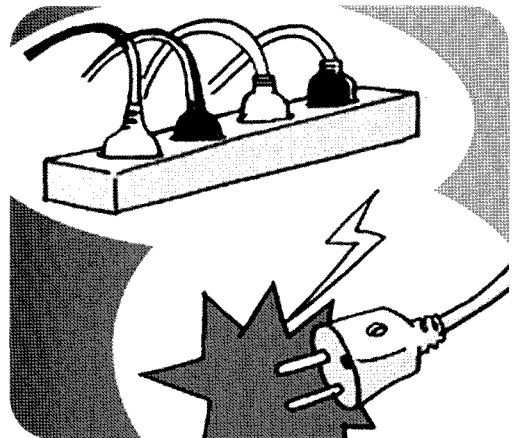


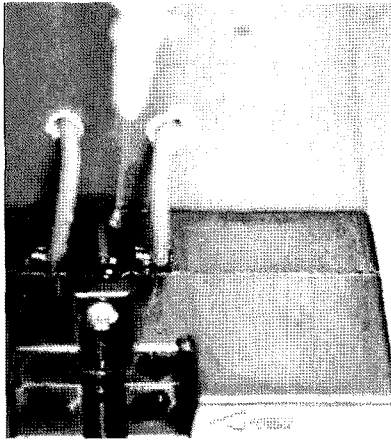
〈그림 3〉 누전차단기의 소손 원인 규명을 위한 실험의 개략도

4. 결과 및 고찰

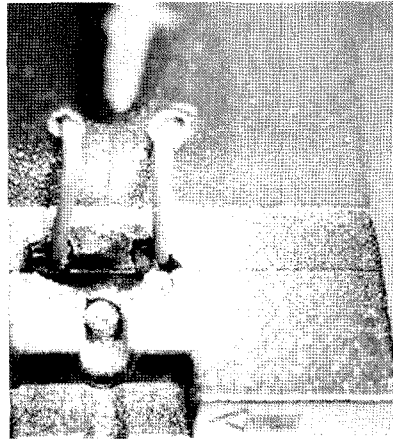
4.1 화염의방사패턴 분석

〈그림 4〉(a)는 누전차단기의 외함에 국제전기위원회(IEC Publ. 112)에서 제안하는 방법으로 염수를 떨어 뜨리기 시작한 상태를 보여준다. 〈그림 4〉(b)는 미소방전(scintillation)이 발생하는 형태를 나타내며 단자간 주변에는 건조대(dry band)가 형성될 때 오손액에서 나온 염분이 흩어진 것을 알 수 있다. 〈그림 4〉(c)는 초기 불꽃이 섬광을 일으키는 현상을 촬영한 것이다. 〈그림 4〉(d)는 차단기가 동작한 후 전원이 지속적으로 공급되며 화재로 이어지는 것을 확인할 수 있었다. 초기 불꽃이 방전될 때까지는 약 9시간 이상의 장시간이 소요되었지만 탄화되면서 화재로 이어지기까지는 약 1~2분의 짧은 시간 내에 형성되는 것을 알 수 있었다.





(a) 실험 설정



(b) 미소 방전



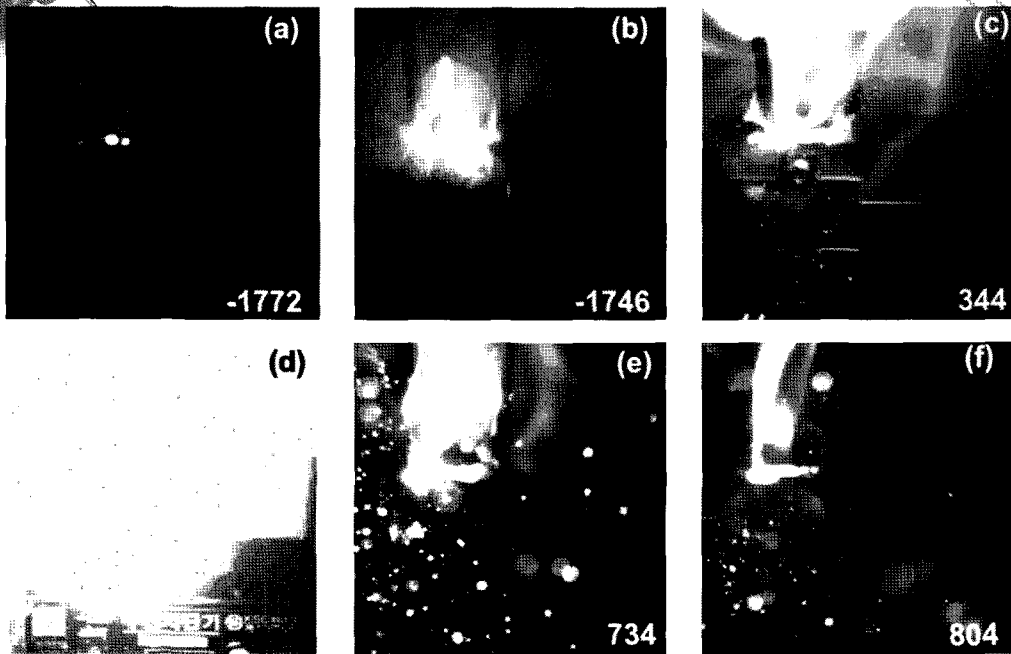
(c) 연기 및 화염



(d) 화명 방사

〈그림 4〉 단상 누전차단기의 출화 패턴

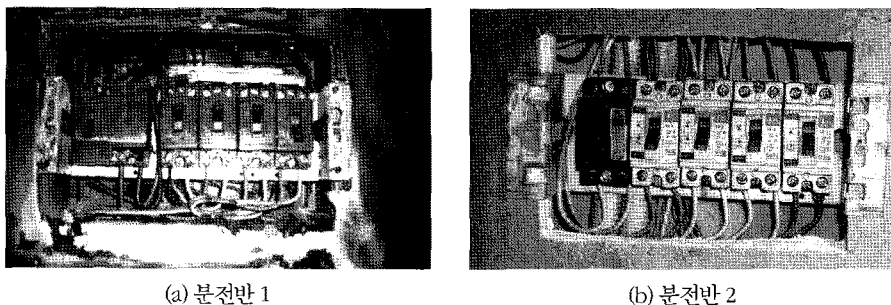
〈그림 5〉는 누전차단기의 전원측 외함 단자 사이에 이물질이 유입되어 소손되는 과정을 초고속이미지시 스템(HSIS)에 의해 촬영된 것이다. 추전차단기 단자 사이에 순간방전이 진행되는 패턴은 미소불꽃방전 후 탄화도전로에 백색 발광이 발생하면 불꽃이 비산하게 되고, 가장 큰 화염이 형성된 후에 발화되는 과정이 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 〈그림 5〉(a)는 극간 탄화도전로가 형성되어 섬광이 발생한 상태를 나타내며, 〈그림 5〉(b)는 14msec 후의 상태를 촬영한 것이다. 〈그림 5〉(c)는 〈그림 5〉(b)에서 1,045msec 후의 현상을 촬영한 것으로 가장 큰 섬광이 발생한 〈그림 5〉(d)는 〈그림 5〉(a)를 기준으로 약 1,215msec 후에 발생한 것을 알 수 있었다. 그리고 〈그림 5〉(e)와 〈그림 5〉(f)는 방사가 완료된 후에도 비산된 불씨와 착화된 불꽃이 존재함을 나타내고 있다.



〈그림 5〉 누전차단기 단자 사이의 화염 이미지

4.2 실체사진 및 저항 특성

〈그림 6〉은 누전차단기 전원측의 이물질 유입에 따른 특성 차이를 분석하기 위해 나타난 실체사진이다. 〈그림 6〉(a)는 정상 제품의 단자를 나타낸 것으로 표면이 균일함을 알 수 있다. 〈그림 6〉(b)는 극간 사이에 이물질이 유입되어 표면에 누설전류가 흘러 소손된 제품이 실체 사진이다. 사진에서도 알 수 있듯이 극간의 중심에 큰 무늬 모양의 소손 패턴을 확인할 수 있고, 단자 쪽에는 탄화 흔적이 있다. 이런 상태로 전기설비를 장시간 방치하거나 사용하게 되면 발열의 면적과 축열 상태가 커지므로 화염을 수반하는 화재의 가능성이 있다.

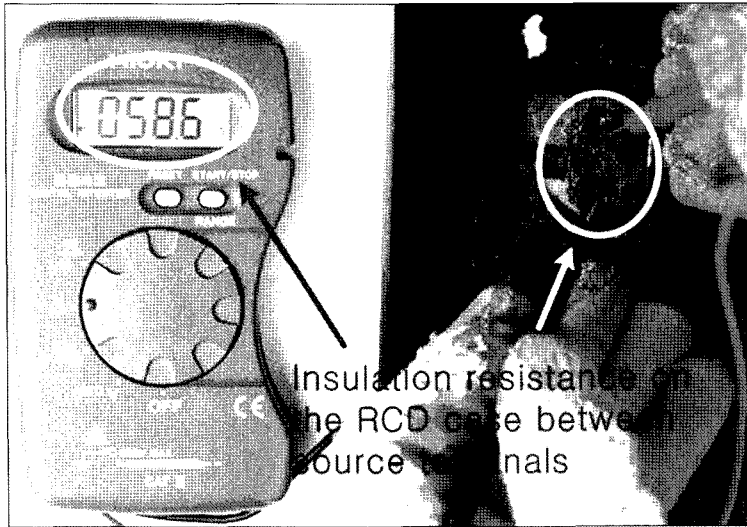


(a) 분전반 1

(b) 분전반 2

〈그림 6〉 누전차단기 전원측의 실체 사진

〈그림7〉은 재현 실험을 통해서 확보된 〈그림6〉(b)의 저항 특성을 측정하는 것이다. 탄화된 단자사이의 저항은 약 58Ω이다. 즉 단자사이에 완벽한 도전로가 형성되었음을 알 수 있고, 그 도전로를 통해서 열이 발생한다. 이런 상황이 장시간 지속되면 발열된 열의 범위가 넓어지고 축열이 진행되므로 주위에 가연성 물질이 있는 경우 일반 화재로 확산되어 2차 화재를 발생 시킬 수 있다.



〈그림 7〉 그림 6(b)의 단자사이의저항

5. 결론

본 논고에서는 저압용 누전차단기의 외함 재료로 사용되고 있는 페놀수지의 탄화 특성을 소손 특성을 객관적으로 제시하기 위해 공인된 방법에 의해 재현실험을 실시하고, 그 결과를 실체현미경, 초고속이미지시스템, 저항특성 등을 입체 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 누전차단기 외함의 전원축이 오염되어 있는 경우 미소방전, 건조대 형성, 방사 및 비산 등 반복하면서 착화로 이어지는 것을 실체사진 및 하이스피드이미지 등을 통해서 알 수 있다.
- (2) 외함의 열화는 오염원의 종류, 시간, 주위온도 등에 많은 편차가 있으나, 충분히 축열되고 방사 및 출화로 이어지는 시간은 약 1~2분 정도로 나타났다.
- (3) 실체사진 분석에서 극간의 중심에 큰 무늬가 나타내며 단자 쪽에서는 적은 탄화 흔적을 나타냈고, 저항은 약 58Ω이므로 단자사이에 완벽한 도전로가 형성되었음을 알 수 있다.