

전원코드의 접촉 불량에 의해 형성된 파형 및 플러그의 특성

최충석[†] · 김향곤 · 김동욱 · 김영석

전기안전연구원(한국전기안전공사 부설)

(2004. 8. 12. 접수 / 2005. 2. 4. 채택)

The Properties of Waveform and Plug Formed by Poor Contact of Power Cord Sets

Chung-Seog Choi[†] · Hyang-Kon Kim · Dong-Ook Kim · Young-Seok Kim

Electrical Safety Research Institute attached to KESCO

(Received August 12, 2004 / Accepted February 4, 2005)

Abstract : In this paper, we analyzed ignition characteristics of combustible material and the waveform of power dissipation, voltage and current by poor contact. And the surface structure of plug by poor contact was analyzed. In the results of experiment, the heat generated by poor contact and ignited the combustible material on power cord sets. The insulation material was molten and carbonized by the heat conduction through plug pin, and voids were formed inside of insulation material. The waveform of voltage and power dissipation distorted because of a growth of oxidation by poor contact. In particular, in case that load was big load, the waveform of voltage and power dissipation severely distorted as with the passage of time. The surface of plug pin was changed from erosion mark to welding mark according to big load. The results will be applied to the cause analysis of electrical disaster.

Key Words : poor contact, power cord sets, ignition, waveform, power dissipation

1. 서 론

옥내용 전기기구의 전원선으로 사용되는 일체형 코드는 가요성 및 절연성이 우수하며 구조는 연동선을 꼬아 합친 것 위에 절연체(PVC)로 절연한 것이다. 저압용 일체형 전원코드는 절연재료에 따라 비닐코드, 고무코드 등으로 나눌 수 있으며, 전압에 따라 110[V]와 220[V], 접지구의 유무에 따라 접지형과 비접지형 등으로 구분한다. 일체형 코드에서의 화재발생 부위는 플러그 부분, 연장코드 부분, 연장코드와 부하기구의 접속부 부분에서 발생하며, 화재 원인은 접속 및 접촉 불량, 반단선, 망열 불량에 의한 전선과열, 플러그 몸체 및 피복 절연물의 절연열화, 과전류(과부하) 등에 의한 선간단락이나 지락사고 등으로 화재가 발생한다¹⁻³⁾. 전선 접속부에서의 접촉 불량에 의한 발열 메커니즘, 절연물의 열화 및

화재 위험성 등에 대한 연구는 일부 진행 중에 있으나^{4,6)} 콘센트와 플러그 연결 부위에서 발생하는 접촉 불량에 대한 연구는 미미한 실정이다⁷⁻¹¹⁾.

본 연구에서는 일체형 비닐코드 접속부에서 접촉 불량에 의한 비닐코드 절연물의 열화 특성과 부하 용량 및 시간경과에 따른 접촉 불량부의 전압, 전류, 전력파형 변화를 분석하였으며, 접촉 도체의 외형 및 표면구조 변화를 분석하여 전기재해 진행과정 및 원인 분석에 응용하고자 한다.

2. 이론적 배경

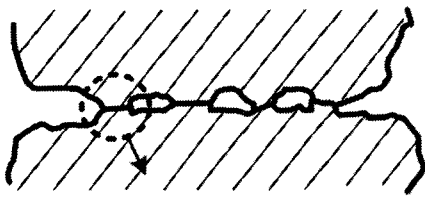
배·분전반 및 전기기계기구 등에는 전선과 전선의 접속, 전선과 기기단자의 접속 등 다수의 전기적 접속부가 존재한다. 이들 도체 부분의 전기적 접속 및 접촉에 있어서 불완전 접속, 장시간 운전 및 진동등에 의한 접촉저항의 증가로 발열하여 전기재해가 일어나게 된다. IEC 60943에 도체 접속 및 접촉에서 나타나는 접촉저항과 이의 열화 및 발열에 대

[†]To whom correspondence should be addressed.
enctek@naver.com

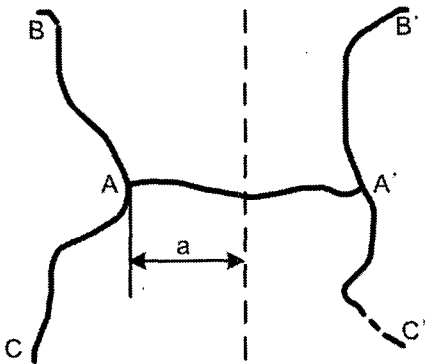
하여 언급되어 있다. 금속 도체의 접촉저항은 통상 $0.1[\Omega]$ 이하이지만 외견상의 접촉면적 감소, 접촉압 저하, 산화피막의 형성 등으로 접촉저항은 증가하게 된다. 금속의 표면은 아무리 경면으로 가공하더라도 현미경으로 관찰하면 요철의 형태를 지닌다. 이 때문에 미세 가공한 도체를 서로 접촉시키더라도 전면(全面)으로 접촉되지 않고 도체 표면의 블록부로 점접촉하며 전류는 이들 점접부분을 통하여 흐르게 된다. 그러나 이들 접촉부분은 가해지는 압력에 따라 접촉계면에 탄성변형이나 소성변형이 발생하는 어떤 면을 얻게 된다. 이 접촉면적을 실질 접촉면적이라고 하며, 실제로는 이 실질접촉면적을 통하여 전류가 흐르게 된다. Fig. 1에 도체의 접촉상태를 나타냈다.

두 도체의 접촉부에는 전류의 흐름이 접촉면에만 한정되므로 전류의 통로가 좁아짐에 따른 집중저항 (constriction resistance ; R_c)과 접촉재료의 산화물, 유화물 등의 화합물이나 흡착가스의 피막을 통하여 발생하는 경계저항(film resistance ; R_i)의 합인 접촉저항(contact resistance ; R_e)이 존재하게 된다. 이 집중저항과 경계저항은 다음 식으로 (2)와 (3)로부터 구할 수 있다¹²⁾.

$$R_e = R_c + R_i \quad (1)$$



(a) cross-section of contacts



(b) contact point of radius a

Fig. 1. Elementary contact point of radius a

$$R_c = \frac{\rho}{2na} \quad (2)$$

$$R_i = \frac{\sigma_0}{n \pi a^2} \quad (3)$$

- 단, ρ : 접촉재료의 고유저항률
- n : 전기적 접촉점의 수
- a : 접촉점의 반경
- σ_0 : 표면저항

위의 식에 의해 접촉저항을 측정하기란 현실적으로 어려우며 접촉불량 부위양단의 접촉전압[V]과 통전전류[A]의 관계를 통하여 계산한다.

3. 실험방법

전원코드의 접촉 불량에 의한 특성을 해석하기 위해 Fig. 2와 같은 실험 장치를 구성하였다. 실험에 사용된 전원선은 일체형 비닐코드(VCFTK, $0.75\text{mm}^2 \times 2\text{C}$)를 사용하였으며, 220[V]의 실험전원은 전압조정기(10kVA, Daelim, Korea)를 이용하여 공급하였다. 전원이 공급된 상태에서 전원 플러그를 멀티 탭에 접촉시키고 접촉면에서 접촉불량이 발생할 수 있도록 접촉불량실험장치(AG-10, KESCO, Korea)를 이용하였다. AG-10의 가진기(vibrator)는 3,000rpm으로 진동하였으며 접촉불량부에서 산화물이 성장하기 시작한 때에 AG-10의 작동을 멈추고 접촉불량부에서의 산화물의 성장특성과 전기적 특성을 분석하였다. 실험에 사용된 부하는 저항성 부하인 백열전구로 부하의 크기에 따른 특성변화를 해석하기 위해 200~1,000[W]까지 200[W] 단위로 5단계나누어 실험하였다.

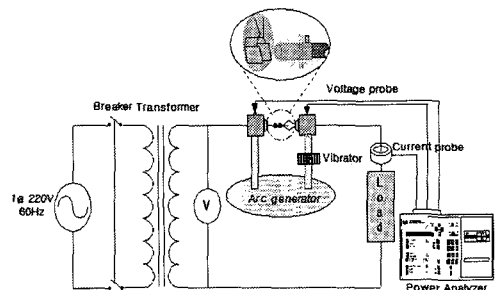


Fig. 2. Schematic diagram for poor contact experiments of power cord sets

실험이 진행되는 동안 실험회로의 전기적 특성 변화를 정밀전력분석계(3030A, BMI, USA)와 오실로스코프(TDS-3052, Tektronics, USA)를 이용하여 분석하였으며 접촉 불량에 의한 전원 코드의 열화 상태, 접촉 도체의 외형 및 표면구조를 실체현미경(SV-11, Carlzeiss, Germany)과 주사전자현미경(SEM, JSM-6400, JEOL, Japan)을 이용하여 분석하였다. 또한, X선 투과분석장치(X-ray Analyzer, Pcba Analyzer, Phoenix, Germany)를 이용하여 전원선 내부의 구조는 열화 패턴을 해석하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1. 일체형 전원코드의 구조 분석

Fig. 3은 Fig. 2의 실험 장치를 사용하여 콘센트 핀(칼)받이와 일체형 코드 핀(칼) 접속부에서 접촉 불량이 발생하여 1시간이 경과한 때의 플러그 몸체의 열화상태를 정상제품과 비교한 것이다. (1)은 220[V], 비접지형 플러그로 ㉑는 정상품의 외형을 나타내며, ㉒는 접촉 불량에 의해 열 열화된 플러그로 플러그 핀을 통해 전도된 열에 의해 핀 지지물과 플러그 몸체가 심하게 용융, 탄화되고 변형되었다.

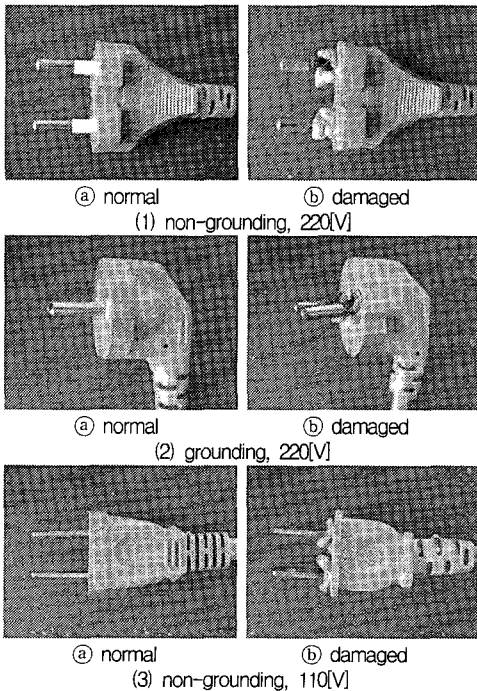


Fig. 3. Photographic appearance of power cord sets

(2)는 220[V], 접지형 플러그로 ㉑는 정상품의 외형을 나타내며, ㉒는 접촉 불량에 의해 열 열화된 플러그로 플러그 핀 지지물과 플러그 몸체가 심하게 용융, 변형되었다. (3)은 110[V], 비접지형 플러그로 ㉑는 정상품의 외형을 나타내며, ㉒는 접촉 불량에 의해 열 열화된 플러그로 플러그 핀과 맞닿은 플러그 몸체 절연물이 열 변형을 일으켰다. 즉 접촉이 불량한 경우 인가된 전압의 종별에 관계없이 변형은 비교적 일정하게 발생한 것으로 보아 열전도가 소손의 주요인자로 판단된다.

Fig. 4는 콘센트 핀받이와 코드 플러그 핀 사이에 가연성 물질(탈지면)이 접촉되어 있고 접촉 불량이 발생했을 때의 착화 현상을 재현한 것으로 접촉 불량에 의해 발생한 열이 충분히 방산되지 못하고 축열이 형성되면 착화가 가능함을 보여주고 있다.

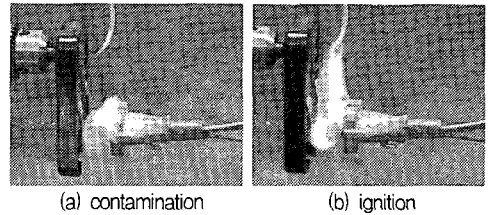


Fig. 4. Ignition of combustible materials by poor connection

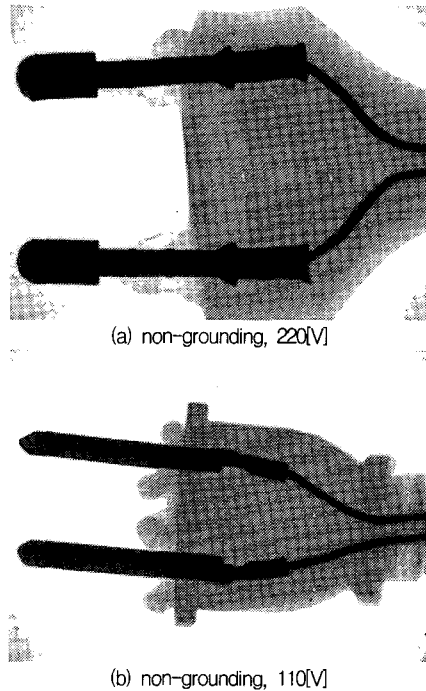


Fig. 5. X-ray transmission analysis of power cord sets

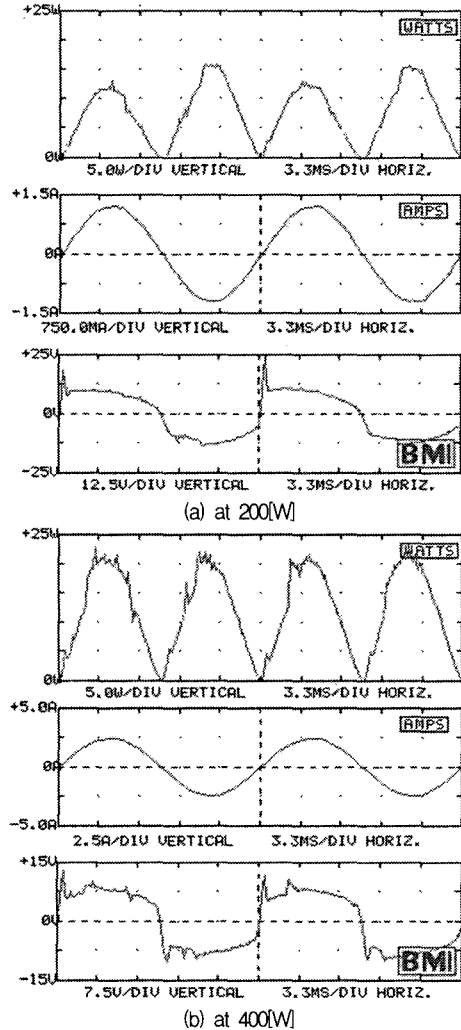
Fig. 5는 Fig. 3의 플러그 핀을 통해 전도된 열에 의해 열화된 플러그를 X선 투과분석 장치를 이용하여 내부를 비파괴 분석한 것이다. (a)는 열 열화된 220[V] 비접지형 일체형 전원선의 플러그로 핀 지지물과 핀 부근의 절연물이 심하게 용융되었으며, 플러그 몸체 내부에 보이드(void)가 형성되었다. (b)는 열 열화된 110[V] 비접지형 일체형 전원선의 플러그로 접촉 불량에 의해 발생한 열이 플러그 핀을 통해 전도되면서 핀과 접촉된 절연물이 심하게 용융됨을 알 수 있다. 즉 이런 접촉 불량으로 장시간 노출되고 발열과 방열의 균형이 무너지면 핀 지지대의 변형에 따른 도체의 혼촉으로 인한 선간 단락 사고로 발생되어 화재로 진행될 수 있다.

4.2. 전기적 파형 변화 분석

Fig. 6과 Fig. 7은 Fig. 2의 실험장치를 이용하여 일체형 비닐코드의 플러그 핀과 멀티 탭의 핀반이 접속부에서 접촉 불량이 발생했을 때 부하용량 변화에 따른 접속부의 전압, 전류, 전력 등의 파형변화를 정밀전력분석계를 이용하여 실시간으로 측정된 데이터를 해석한 것이다. 취득한 데이터는 실험이 진행되고 안정화된 때를 기준하여 30분이 경과한 때의 값을 나타낸 것이다. (a)는 200[W]일 때로 접촉 불량 부위에서의 소비전력은 7.845[W]였으며 반주기마다 파형의 크기에 차이가 나타났다. 전류 파형은 정현파를 나타내고 있으나 전압파형은 정(+) 주기로 바뀔 때마다 피크가 튀는 것을 볼 수 있었다. 이때의 접촉전압은 9.8[V]였다. 실험이 진행되는 동안 접속부에서는 산화물이 지속적으로 성장되었다. (b)는 400[W]일 때로 접촉 불량 부위의 소비전력은 12.15[W]로 나타났으며 전류파형은 정현파를 계속 유지했으나 전압파형은 반주기 시작마다 피크가 튀는 것을 알 수 있었다. 접촉전압은 7.4[V]였으며 실험이 진행되는 동안 접속부에서 산화물이 계속 성장되었다. (c)는 600[W]일 때로 접촉 불량 부위에서의 소비전력은 11.19[W]를 나타냈으며, 전압파형은 구형파로 접촉전압은 4.7[V]였다. 접속부에서는 산화물이 계속 성장되었다. (d)는 800[W]일 때로 접촉 불량부의 소비전력은 15.94[W]였으며 전압파형은 구형파의 형태를 나타냈으며 주기가 바뀔 때 피크가 튀는 것을 확인할 수 있었다. 접촉전압은 5.1[V]를 나타냈다. 접속부에서는 산화물의 성장과 동시에 약간의 비산현상이 나타났다. (e)는 1,000[W]일 때로 접촉 불량부에서의 소비전력은 17.22[W]였

으며, 전압파형에는 심하게 변동하였으며 접촉전압은 4.6[V]를 나타냈다. 실험이 진행되는 동안 산화물이 지속적으로 성장하였다. 이상의 실험과 분석에서 접속부에서 접촉 불량이 진행되는 동안 나타나는 특이한 전압파형을 검출하여 전기설비의 진단에 응용이 가능하며 이를 통해 전기재해를 조기에 예방할 수 있을 것으로 기대한다.

Fig. 7은 Fig. 6과 같은 실측데이터를 통하여 각각의 부하에서의 접촉불량 부위의 접촉전압과 소비전력의 변화를 그래프로 나타낸 것이다. (a)는 200[W]일 때로 시간이 경과함에 따라 지속적으로 접촉전압과 소비전력이 증가함을 알 수 있다. (b)는 600[W]일 때로 시간의 경과에 따라 점차 접촉전압과 소비



전원코드의 접촉 불량에 의해 형성된 파형 및 플러그의 특성

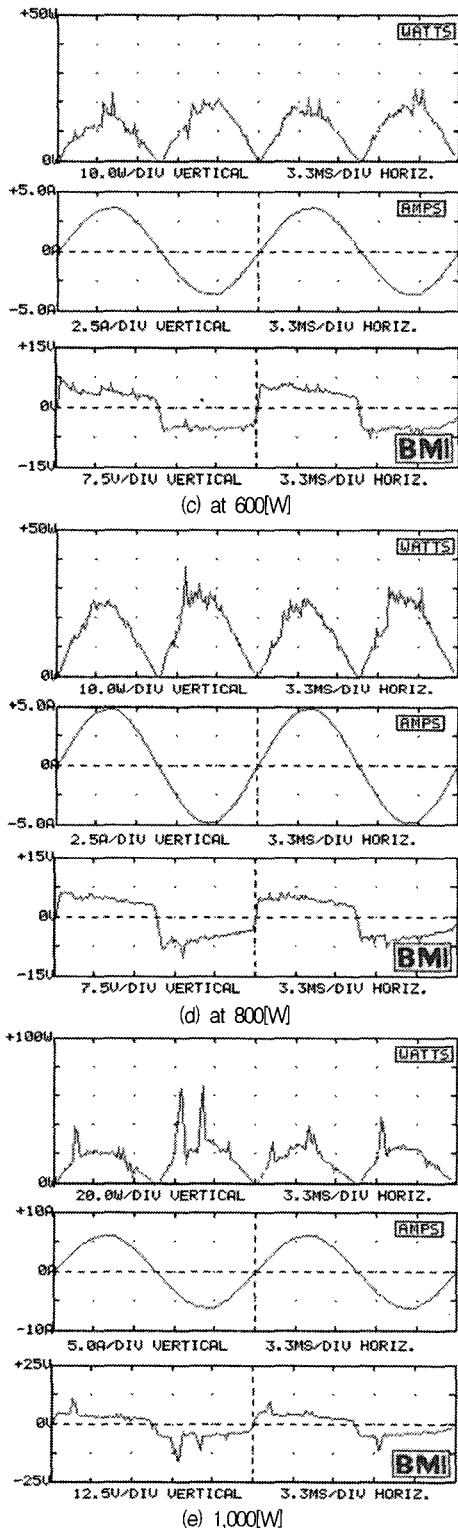


Fig. 6. Variations of electrical waveforms by load

전력이 상승함을 알 수 있으며, (c)는 1000[W]일 때
 로 접촉 불량에 발생한 부분에서 산화물의 성장이
 불규칙하여 접촉전압과 소비전력의 값에 심한 변동
 이 있음을 알 수 있으며 Fig. 6의 파형변화에서도 이
 를 확인할 수 있다. 이상과 같이 소비전력과 접촉전
 압의 함수관계가 비례인자로 작용되는 것은 당연한
 결과이며, 이는 발열의 양이 시간의 경과에 따라 많
 아짐을 의미하며 방사가 잘 이루어지지 않을 경우
 발열에 따른 재해의 발생 가능성은 상대적으로 커
 짐을 알 수 있다. 도체 접속부에서의 주 변화인자는

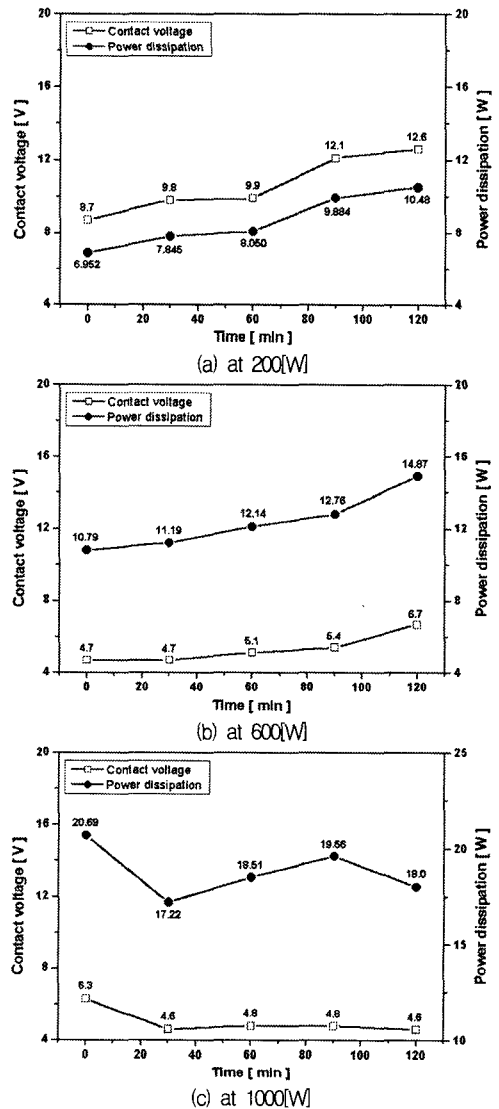


Fig. 7. Variations of contact voltages and power dissipations by time

도체간 접촉저항으로 접촉불량에 의한 아크, 산화피막의 형성, 산화물의 성장 등으로 접촉면적, 접촉도체의 조성변화로 접촉전압이 변하게 되며 이와 더불어 접촉불량 부위의 소비전력도 변화하게 된다. 따라서, 접촉불량에 의한 전기재해 예방을 위하여 접속품질의 향상 및 접속방법의 개선이 요구된다.

4.3. 접촉 플러그의 구조 분석

Fig. 8은 실험 후 일체형 코드 플러그 핀의 외형 변화를 실제현미경을 이용하여 분석한 것이다. (a)는 정상상태의 것으로 황동제의 플러그 핀 외부를 주석 도금하여 아크에 대한 내구성을 유지하도록 되어 있으며, (b)는 200[W]의 부하에서 소손된 것으로 플러그 끝부분이 접촉 불량시 발생한 높은 열과 스파크에 의해 침식(erosion)되었다. (c)는 400[W]의 부하에서 소손된 것으로 접촉 불량시 발생한 부분에 산화물이 생성되었다. (d)는 600[W]의 부하에서 소손된 것으로 접촉 불량시 발생한 열과 스파크에 의한 등근 형태의 용융흔들이 표면에 부착된 형태를 나타냈으며 (e)는 800[W]의 부하에서 소손된 것으로 600[W]에서와 유사한 특징을 보였다. (f)는 1,000[W]의 부하에서 소손된 것으로 접촉 불량시 발생한 열과 스파크에 의해 심하게 용융되었다. 이상의 분석에서 부하가 증가함에 따라 도체의 외형이 침식흔(erosion mark)에서 용흔(welding mark)으로 변화함을 알 수 있었다.

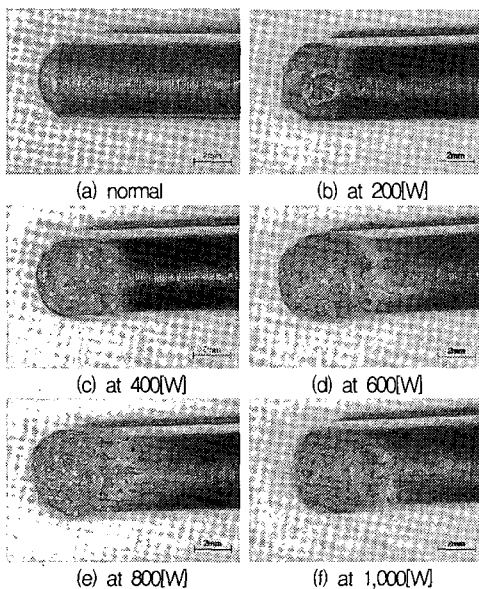


Fig. 8. Shape variations of plug pins by load

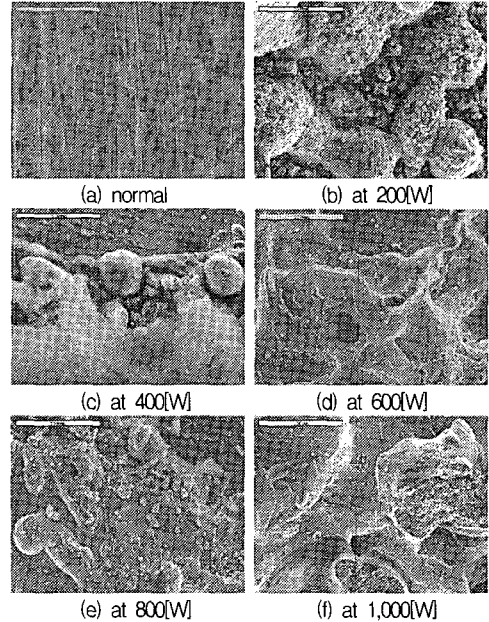


Fig. 9. Surface analysis of multi-tap sockets

Fig. 9는 Fig. 8의 플러그 핀과 접촉한 멀티 탭 핀 받이의 표면구조를 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 분석한 것이다. (a)는 정상상태의 것으로 제조시 생성된 수직방향의 연선구조를 볼 수 있으며, (b)는 200[W]의 부하에서 소손된 것으로 등근 형태의 용융 흔적을 볼 수 있다. (c)는 400[W]의 부하에서 소손된 것으로 플러그 핀과 맞닿은 부분에서 높은 열과 스파크에 의해 용융 흔적이 형성되었다. (d)는 600[W]의 부하에서 소손된 것으로 접촉 불량시 발생한 열과 스파크에 의해 용융됨을 볼 수 있다. (e)와 (f)는 800[W]와 1,000[W]의 부하에서 소손된 것으로 접촉 불량시 발생한 열과 스파크에 의해 심하게 용융되었다.

5. 결론

일체형 비닐코드 접속부에서 접촉 불량이 발생했을 때 나타나는 전류, 전압, 전력 등의 파형 특성과 소손된 접속 도체의 외형 및 구조를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 접촉 불량에 의해 플러그 핀 주위의 절연물이 탄화됨을 알 수 있었으며, 시간이 경과할수록 확대되어 열가소성수지의 플러그 몸체가 용융되어 외형의 변형이 일어났으며 플러그 몸체 내부에는 열 변

형에 의해 보이드가 형성되었다.

2) 콘센트 핀반이와 일체형 코드 플러그 핀 사이에 가연성 물질이 존재할 경우 접촉 불량에 의해 발생한 열에 의해서 착화될 수 있음을 밝혔다.

3) 전기적 파형 분석에서 부하용량이 작을 때에는 시간 경과에 따라 소비전력과 접촉전압이 지속적으로 증가하였으나, 부하용량이 클 때에는 시간의 경과에 따라 소비전력과 접촉전압의 크기에 변동이 있었다.

4) 실험이 진행되는 동안 접촉부에서는 적열로 및 산화물이 성장하였다. 전류파형은 일정한 정현파를 나타냈으나, 전압파형은 주기가 바뀔 때마다 피크가 발생하는 것을 볼 수 있었으며 부하용량이 증가할수록 구형파의 형태를 나타냈다.

5) 접촉도체의 외형과 표면구조 분석에서 부하용량이 커짐에 따라 플러그 핀에 나타나는 용융 흔적이 침식흔에서 둥근 형태 용흔으로 변화하는 것을 입증하였다.

감사의 글 : 본 연구는 산업자원부 전력산업기반기금의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) 김영대, 전기재해 통계분석, 한국전기안전공사, pp. 7~63, 2003.
- 2) 최충석 외 5, “전기화재공학”, 동화기술, pp. 195~265, 2004.
- 3) 한국산업규격, KS C 3304, 산업자원부 기술표준원, 2000.
- 4) 中野弘伸, “電氣配線からの發火原因に関する考察”, 日本火學會論文誌, Vol. 46, No. 2, pp. 1~5, 1996.

- 5) 製品評價技術センター北關東支所, “電線の熔融痕に関する一考察”, 日本火災學會論文集, Vol. 48, No. 1, pp. 34~37, 1998.
- 6) 三木康生 外 2, “電氣接點の集中抵抗について”, 日本電氣學會論文誌 A, Vol. 89, No. 1, pp. 151, 1974.
- 7) Zhuan-Ke Chen, Koichiro Sawa, “Polarity effect of unsymmetrical material combination on the arc erosion and contact resistance behavior”, IEEE trans. on components, packing and manufacturing technology, Vol. 18, No. 2, pp. 334~343, 1995.
- 8) D. Ron Liu, Tom Bracket, Shaun McCarthy, “Contact resistance comparison of good and bad crimp joints with tinned wires under thermal shock”, Proceedings of the Forty-Seventh IEEE Holm Conference on, pp. 35~43, 2001.
- 9) Nouredine Ben Jemaa, et al, “Erosion and contact resistance performance of materials for sliding contacts under arcing”, IEEE trans. on components and packing technologies, Vol. 24, No. 3, pp. 353~357, 2001.
- 10) Paul G. Sade, et al, “The unusual electrical erosion of high tungsten content, tungsten copper contacts switching load current in vacuum”, IEEE trans. on components and packing technologies, Vol. 24, No. 3, pp. 320~330, 2001.
- 11) Roland S. Timsit, “Electrical contact resistance : properties of stationary interfaces”, IEEE trans. on components and packing technology, Vol. 21, No. 1, pp. 85~98, 1999.
- 12) IEC 60943, Guidance concerning the permissible temperature rise for parts of electrical equipment, in particular for terminals, 1998.