저압용 소형 관형퓨즈의 용단 특성에 관한 실험적 연구

지흥근^{*} · 김진표 · 송재용 · 최영우 · 박찬성 · 박남규 · 길경석^{*}

국립과학수사연구원 · ^{*}한국해양대학교

(2013. 7. 10. 접수 / 2013. 9. 4. 채택)

An Experimental Study on Melting Characteristics of Low-voltage Miniature Cartridge Fuse

H. K. Ji^{*} · J. P. Kim · J. Y. Song · Y. W. Choi · C. S. Park · N. K. Park · G. S. Kil^{*}

National Forensic Service · ^{*}Korea Maritime University

(Received July 10, 2013 / Accepted September 4, 2013)

Abstract : This paper dealt with melting characteristics of low-voltage miniature cartridge fuse used for 220 V electronic equipment. The experimental sample is low-voltage miniature cartridge fuse with rating of 250 V(3A) and size of 5×20 mm. In order to evaluate melting and scattering characteristics of the fuse, we applied to 8/20 μ s surge current, overload current and external thermal stress such as flame of fire. From the experimental results, the fuse element was melted and scattered by applied surge current(above 0.79 kA) and overload current(above 4.5 A). It was also attached to the inner surface of the fuse tube. The fuse element was attached as a thin film on inner surface of fuse tube when large surge current was applied. It was confirmed, however, the fuse element was not changed by external thermal stress such as flame and hot-air.

Key Words : miniature cartridge fuse, melting characteristics, fuse element, melting and scattering

1. 서론

전기전자기술의 발달과 더불어 전기에너지의 사용이 급증하고 있는 추세이며, 다양한 전기기기가 광범위하게 사용되고 있다. 다양한 전기기기의 사용 증가에 따라 전기화재의 위험성 또한 높아지는 실정이며, 전기화재 예방 및 방지를 위한 다양한 기술이 개발되어 적용되고 있다. 전기기기에 대한 가장 손쉽고 적극적인 화재 예방 및 방지대책의 한 가지는 전기기기의 전원 공급부에 과전류 방지용 퓨즈를 설치하는 것으로 220 V의 교류 상용전압을 사용하는 기기에는 대부분 전원퓨즈가 설치되어 있다.

전기기기의 전원 공급부에 사용되는 전원퓨즈의 역할은 부하측에서 전기적 결함 등으로 인해 과전류가 발생되는 경우, 전원퓨즈의 가용체가 용단되면서 회로를 분리하여 과전류로 인한 사고가 전원측에 영향을 미치지 않도록 차단시키는 것이다. 또한 전원측에서 어떠한 원인으로 과전압 또는 과전류가 유입되는 경우, 앞서 언급한 것과 동일하게 가용체가 용단되면서 전원측과 부하측을 분리시켜 부하측을 보호하는 목적으로 사용된다. 이러한 전원퓨즈의 사용 목적에 근거하여 전기기기에서 화재가 발생하는 경우, 전기기기의 사용 여부 및 과전류 발생 여부에 대한 확인이 필요한데 이때 가장 기본적으로 전원퓨즈에 대한 검사가 이루어진다. 전원퓨즈에 대한 검사는 육안 검사, 도통시험 및

X-ray를 이용한 검사 방법이 주로 이용되고 있으며, 전원퓨즈 가용체의 존재 유무 및 비산 흔적 식별 여부 등을 검사하는 것이 일반적이다¹⁻³⁾.

현재 퓨즈의 용단 특성에 대한 연구는 일부 진행된 상태이며^{4,6)}, 퓨즈의 용단 형상 등에 대한 평가는 단순한 검사자의 경험에 의존하여 검사가 이루어지고 있다.

따라서 본 논문에서는 가장 광범위하게 사용되고 있는 250 V, 3 A 정격의 소형 관형퓨즈(miniature cartridge fuse, 이하 유리관형 퓨즈로 표기함)⁷⁾ 중, 보호관이 유리로 구성된 유리관형 퓨즈를 대상으로 서지전류, 부하과전류 및 외부 열원에 의한 용단 실험을 실시하였으며, 용단 이후 형상에 대한 검사를 통하여 구체적인 용단 원인을 추정할 수 있는 실험적 연구를 수행하였다.

2. 퓨즈 이론

일반적으로 전원퓨즈는 전기회로를 보호하기 위한 목적으로 전원 공급부에 삽입되며, 과전류 및 단락전류와 같은 이상전류가 발생하는 경우, 이상 전류에 의한 전기적 발열로 가용체가 용단 비산되면서 이상전류를 차단하는 기능을 수행한다. 가장 널리 이용되는 퓨즈는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 보호관 형태로 가용체(Fuse element), 몸통(Tube, 유리관 또는 세라믹관), 캡(Ferrule) 및 땀납 부분으

^{*}Corresponding Author: Hongkeun Ji, Tel: +82-42-866-4654, E-mail: hkji1024@korea.kr
National Forensic Service, 1524, Yuseong-daero, Yuseong-gu, Daejeon 305-348, Korea

Fig. 1. Structure of a miniature cartridge fuse.

Fig. 2. Example of broken fuse in the fire scene.

로 구별할 수 있으며⁸⁾, 퓨즈의 가용체는 일반적으로 용점이 낮은 금속을 이용하는데 차단 전류의 용량에 따라 텅스텐(W), 은(Ag)-아연(Zn)-구리(Cu) 합금, 은(Ag)-구리(Cu) 합금 등을 이용하며, 대용량의 전류에 대한 보호용으로는 은(Ag) 또는 아연(Zn)을 단독으로 사용하기도 한다.

전기화재 현장에서 전원퓨즈의 용단 원인은 크게 전기적 요인 및 외부 화염에 의한 영향으로 구분되며, 외부 화염에 의해 퓨즈가 용단되는 경우에는 가용체가 용융되면서 단선되는 형태로 퓨즈를 보호하고 있는 유리관(또는 세라믹관) 등에 비산 흔적이 남지 않는 특성이 있다. 전기적 결합에 의해 전원퓨즈가 용단되는 경우, 퓨즈의 가용체를 통하여 흐르는 이상전류에 의한 전기적 발열로 용단 과정에서 비산되는 특징을 나타낸다. 전기적 요인에 의한 용단 비산되는 형상은 부하측 기기의 절연파괴 등에 의해 부하 과전류가 발생하는 경우와 외부 전원측으로부터 유입되는 서지(Surge)와 같은 이상전류에 의해 나타날 수 있다. Fig. 2에는 화재 현장에서 수거한 전원퓨즈의 X-ray 사진을 나타낸 것으로 전기적 요인에 의해 용단되는 경우에는 Fig. 2(a)와 같이 유리관 벽면에 둥근 망울 형상의 가용체 비산물이 부착되는 형상을 보인다. 연소 확대 과정에서 외부 화염에 노출되는 전원퓨즈는 Fig. 2(b)와 같이 가용체 부분이 용단되더라도 유리관 벽면에 비산 흔적 등은 식별되지 않는 특징을 나타낸다.

3. 퓨즈 용단 실험

퓨즈는 전기적인 요인 및 외부 열원에 의해 용단되는 특성을 가지며, 전기적인 요인의 경우에는 부하측의 전기적 절연파괴 또는 과전류 유발 등에 의한 것과 외부에서 유입되는 서지 등의 이상전류에 의해서도 용단되는 특성을 나타낸다.

따라서 본 연구에서는 퓨즈의 용단 특성 및 용단 이후

Fig. 3. Photograph of a miniature cartridge fuse using by experimental.

형상에 대한 평가를 위하여 가장 광범위하게 사용되는 250 V, 3 A, 5×20 mm 규격의 유리관형 퓨즈를 대상으로 평가하였으며, 서지전류, 부하 과전류 및 외부 열원에 대한 용단 형상 및 특성을 비교 분석하였다. 실험에 사용한 전원퓨즈의 모습은 Fig. 3과 같다.

3.1. 서지전류에 의한 용단 특성

먼저 외부에서 이상전압 및 전류가 유입되는 경우에 대

(a) Waveform of a 1.2/50 μ s voltage (b) Waveform of a 8/20 μ s currentFig. 4. Waveform of standard impulse 1.2/50 μ s voltage and 8/20 μ s current.

Table 1. Characteristics of fuse element changes of surge current.

surge voltage[kV]	surge current[kA]	fuse element
0.5	0.25	None
1.0	0.48	None
1.5	0.74	Discolor
1.6	0.79	Scattering
2.0	0.91	Scattering
2.5	1.26	Scattering
3.0	1.49	Scattering
3.6	1.78	Scattering
4.2	2.01	Scattering

한 평가를 위하여 IEC-61000-4-5에 명시된 표준 뇌임펄스 전압을 인가하고, 전원퓨즈를 통해 서지전류가 흐를 때 용단 특성을 평가하였다. 외부로부터 유입되는 이상전압 및 전류에 대한 모의를 위하여 최대 1.2/50 μ s, 4.2 kV의 표준 뇌 임펄스 전압과 8/20 μ s, 2.1 kA 표준 뇌임펄스 전류를 인가할 수 있는 서지발생장치(PSurge-4010, Haefely, Swiss)를 이용하였으며, 표준 뇌임펄스 전압 및 전류의 파형은 Fig. 4에 나타내었다⁹⁾.

서지전압은 500 V부터 인가하였으며, 전압, 전류의 변화에 따른 가용체의 상태에 대하여 확인 및 분석하였다. 서지전류에 의한 퓨즈 용단 실험 결과, 1.5 kV의 전압을 인가하였을 때 전원퓨즈 가용체 부분이 용단되지는 않으나 전반적으로 열변색되는 특징이 확인되었으며, 1.6 kV 이상의 전압에서는 가용체가 용단 비산되는 특징을 나타냈다. 또한 인가되는 서지전압의 크기가 증가할수록 퓨즈의 가용

체를 통해 흐르는 서지전류 또한 증가되며, 서지전류의 크기가 커질수록 가용체의 비산 정도가 강하게 나타나는 것으로 확인되었다. 서지전류 증가에 따라 가용체가 강하게 비산되는 경우, 유리관 벽면에 전반적으로 용융 비산물이 도포되는 형상을 나타내는 특징을 보였다. 서지전압 인가에 따른 가용체의 용단 비산 여부에 대한 결과는 Table 1과 같으며, 서지전압 인가에 따라 퓨즈의 가용체를 통해 흐르는 서지전류의 크기를 함께 나타내었다.

Fig. 5는 서지전압 인가에 따른 퓨즈의 용단 형상을 나타낸 것으로 가용체가 용단 비산되는 임계 전압은 1.6 kV로 나타났다. 상대적으로 낮은 서지전압에서는 망울 형상의 비산물이 유리관 벽면에 부착되어 육안 및 X-ray 검사에서 이들 비산물이 확인 가능하였다.

그러나 상대적으로 높은 2.5 kV 이상의 서지전압에서는 비산물이 유리관 벽면에 전반적으로 넓게 도포되는 형상으로 나타내는데, 이러한 도포되는 형상은 육안 검사를 통해 비산 특징을 식별할 수 있으나, X-ray 검사에서는 정확한 비산 형상이 식별되지 않는 특징을 나타내었다.

따라서 화재현장에서 수거된 전원퓨즈에 대한 검사에서는 반드시 육안 검사 및 도통시험을 수행하여야 할 것으로 판단되며, X-ray 검사만으로 전원퓨즈의 비산 여부를 판단하는 것은 주의하여야 한다.

3.2. 부하 과전류에 의한 용단 특성

전원퓨즈의 설치 목적은 부하측에서 전기적 결함이 발생하는 경우, 전원 공급을 차단시켜 전원측으로 전기적 결함에 의한 사고가 전이되는 것을 막고, 부하측에 지속적인 전원공급으로 인한 사고 확대를 방지하는 것이다. 전원퓨즈 후단의 부하측에서 전기적 결함이 발생하는 경우, 정상적인 조건보다 큰 전류가 흐르게 되어 최종적으로 퓨즈의 가용체가 용단된다. 이러한 퓨즈의 부하 과전류에 대한 용단 비산 특성 평가를 위하여 220 V의 상용전압을 인가한 상태에서 부하 전류 변화에 따른 전원퓨즈의 용단 특성 실험을 수행하였다. 부하 전류의 조절을 위하여 부하저항의 조절이 가능한 부하저항기(Load bank, 광전사 KJS-1R3, Korea)를 사용하였으며, 부하 전류의 크기를 0~15 A 범위에서 조정하여 부하 전류 크기에 따른 전원퓨즈의 용단 비산 특성을 평가하였다.

부하 과전류의 크기에 따른 퓨즈의 용단 특성을 Fig. 6에 나타내었으며, 실험결과, 부하저항기의 가변 가능한 전류 크기 중, 4.5 A의 전류에서 가용체가 용단되는 특징을 나타내었다. 부하 과전류 실험에서 최초 용단되는 전류 4.5 A는 실험에 사용된 퓨즈의 3 A 정격에 비해 150% 큰 전류로 이때에는 가용체 중앙 부분이 용단되는 형태를 나타내었으며, 유리관 벽면에 비산되는 가용체의 용융물은 발생되지 않았다. 부하 과전류의 크기를 500%(15 A)까지 가변하면서 실험을 진행하였으며, 부하 과전류가 250%가 되는 7.5 A 이상의 전류에서 퓨즈의 가용체가 용단 비산되는 특징을 나타내었으며, Fig. 6에 나타낸 바와 같이 과전류가 커질수록 유리관 벽면에 부착되는 퓨즈 가용체의 용융 비산물이 많아지는 경향을 나타내었다.

Fig. 5. Scattering shape of fuse element supplied surge voltage.

Fig. 6. Scattering shape of fuse element supplied overload current.

3.3. 외부 열원에 의한 형상 변화

전원퓨즈는 가용체에 과전류가 흐르는 경우, 과전류에 의해 가용체에 전기적 발열이 발생하여 용단 및 비산되고, 화재 발생 이후, 연소 확대 과정에서도 화염에 의해 전원퓨즈는 용단될 수 있으며, 앞서 언급한 화재 현장에서 수거된 퓨즈에 대한 사례와 같이 전기적 결함에 의한 용단 비산 형상과 외부 열원에 의한 용단 비산 형상은 서로 상이하게 나타나는 것으로 알려져 있다.

따라서 외부 열원에 의해 전원퓨즈가 어떻게 용단되는지를 확인하기 위하여 외부 열원에 의한 퓨즈 용단 특성을 평가하였다. 실험에 적용한 외부 열원으로는 첫 번째로 실제 종이류를 태우는 과정에서 화염 속에 전원퓨즈를 직접 집어넣는 경우, 두 번째로 가스토치를 이용하여 전원퓨즈에 직접 고밀도의 화염을 인가하는 경우 및 세 번째로 열풍기를 이용하여 고온의 열풍을 공급하는 경우의 세 가지 부분에 대한 실험을 수행하였다.

먼저 종이류를 태우는 과정에서 퓨즈를 화염 속에 집어넣고, 약 5분간 화염을 유지한 실험 모습 및 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 실험 결과, 전원퓨즈는 검게 그을리고, 가용체와 땀납으로 연결된 캡(Ferrule) 부분이 유실되기도 하였으나, 가용체는 용단되지 않는 특징을 나타내었다.

두 번째로 가스토치를 이용하여 고온의 화염을 집중적으로 공급하는 경우, Fig. 8과 같은 결과를 나타내었다. 유리관 및 가용체가 땀납으로 연결되는 캡 부분이 용융 및 변형되는 형상을 나타냄에도 불구하고, 퓨즈의 가용체 부분은 용단되지 않는 특징을 나타내었다. 이러한 점을 고려할 경우, 실험에 사용된 퓨즈는 직접적인 화염에 노출되더라도 가용체가 용단되지 않는 것으로 볼 수 있다.

Fig. 7. Changes of fuse element on the fire.

Fig. 8. Changes of tubing glass and ferrule by the flame supplied gas torch.

세 번째로 최대 출력온도 630°C의 열풍 발생이 가능한 열풍기(BOSCH GHG 500-2, Germany)를 이용하여 고온의

Fig. 9. Changes of fuse element on the hot-air.

열풍을 전원퓨즈 표면에 인가하는 경우에는 Fig. 9에 나타난 바와 같이 아무런 외형상의 변화가 발생되지 않는 것으로 평가되었다.

외부 열원에 의한 퓨즈의 용단 특성 실험에서 실험에 사용된 250 V, 3 A, 5×20 mm 규격의 유리관형 퓨즈에서는 인가되는 열원의 종류에 따라 유리관 및 캡 부분이 일부 열 변형되는 것 이외에 퓨즈의 가용체 등은 용단되지 않는 특성을 나타내었다.

3.4. 가용체의 성분 변화

퓨즈에 과전류가 흐르거나 화염과 같은 외부 열원에 노출되는 경우, 가용체에서 어떠한 변화가 발생되는지를 확인하기 위하여 용단 실험에 이용한 전원퓨즈를 대상으로 SEM/EDS(Scanning Election Microscopy ; 전자주사현미경/Energy Dispersive X-ray Spectroscopy ; 에너지분산형분광분석법) 검사법을 이용하여 성분 변화를 분석하였다. 외적인 요인 발생 이후, 가용체의 성분 변화는 Fig. 10에 나타난 바와 같이 일부 없어지는 성분 및 새로이 나타나는 성분 등이 있는 것으로 확인되었다.

먼저 실험 전의 정상적인 퓨즈에서는 Fig. 10(a)에 나타난 바와 같이 Cu-Ag(구리-은) 성분이 대다수를 차지하며, 서지 및 부하 과전류와 같은 과전류 발생 이후에는 Fig. 10(b) 및 Fig. 10(c)에 나타난 바와 같이 Ag 성분이 용융 비산되는 과정에서 소멸되는 특징을 나타내었다. 또한 Fig. 10(b)와 Fig. 10(c)에서 나타나는 Si(규소) 성분은 유리관 벽면에 부착되는 과정에서 유리 성분 중 일부가 포함되어 나타난 것으로 생각된다. 실험 대상 퓨즈는 외부 열원에 의해서는 용융 및 비산되는 특징을 나타내지 않으며, 성분 변화에 대한 분석 결과, Fig. 10(d)에 나타난 바와 같이 Zn(아연), Pb(납) 및 Sn(주석) 성분 등이 추가로 나타나는데 이는 가용체의 땀납 부분이 용융되면서 나타나는 현상으로 판단된다.

Fig. 10. Results of SEM / EDX(Scanning Election Microscopy / Energy Dispersive X-ray Spectroscopy).

퓨즈 가용체의 성분은 용단 원인이 되는 과전류에 따라 다소 상이한 특징을 나타내기는 하나 이는 표본수가 적고, 실제 화재 현장에서 수거한 퓨즈의 가용체에 대한 성분 변화 등에 대한 분석이 이루어지지 않은 상태로 가용체 성분 변화에 대해서는 현장에서 수거한 퓨즈 등을 대상으로 향후 비교 분석 연구를 진행하고자 한다.

4. 결론

본 논문에서는 저압용 전기기기에 광범위하게 사용되는 5×20 mm 크기의 250 V, 3 A 정격을 갖는 전원퓨즈의 용단 특성 및 형상에 대하여 비교 분석하였다.

먼저 서지전류 및 부하 과전류가 퓨즈의 가용체를 통해 흐르는 경우, 서지전류 8/20 μ s 0.79 kA, 부하 과전류 4.5 A (정격의 150%) 이상의 과전류에서 용단 비산되는 특징을 나타내었다. 특히 과전류의 크기가 커질수록 비산되는 용융물의 양도 증가하는 경향을 나타내었으며, 서지전류가 커지는 경우, 용융 비산물이 박막 형태로 유리관 벽면에 넓게 도포되는 특징이 나타내는데 이러한 원인으로 X-ray 검사

에서는 비산 흔적이 관찰되지 않는 특징을 나타낸다. 따라서 화재현장에서 수거된 퓨즈에 대한 검사에서는 반드시 육안 검사, 도통 시험 및 X-ray 검사가 병행되어야 할 것으로 판단된다.

실험에 사용된 전원퓨즈의 경우, 화염이나 열풍 등의 외부 수열에 의해서는 유리관 및 캡 부분이 열변형되더라도 퓨즈의 가용체는 용융되지 않는 특징을 보이며, 전기적인 원인에 의해 용융 비산되는 것과 확연히 구분되는 특징을 나타내었다.

본 연구의 실험 결과는 향후 전기화재 현장에서 전기기기의 검사에 기본지침으로 활용 가능할 것으로 판단되며, 향후 다양한 퓨즈에 대한 실험적 연구를 진행하고자 한다.

References

- 1) W. F. Cooper, Electrical Safety Engineering, 3th Edition 1993.
- 2) A. A. Hattangadi, Electrical Fires and Failures, Mcgraw Hill 2000.
- 3) Marcus O. Durham, Robert , Rosemary Durham, Jason Coffin, Electrical Failure Analysis for Fire and Incident Investigations, Createspace, 2011.
- 4) C. H. Lee, S. K.. Kim and K. J. Ok, “A Study on the Causal Analysis of Electrical Fire by using Fuse”, Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 22, No. 1, pp. 24~28, 2008.
- 5) C. S. Choi, “Analysis of the Melting Characteristics of a Blade Type Fuse Used for Vehicles due to Overload”, Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 24, No. 2, pp. 38~43, 2010.
- 6) Y. H. Kim, “A Study on the Melting Characteristics of Fuse Element by Repeating Overcurrent”, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineering, Vol. 24, No. 2, pp. 120~126, 2010.
- 7) Korean Industrial Standards, KS C0503, Glossary of terms of fuses, 2002.
- 8) COOPER Bussmann Data sheet 2019, 5×20 mm fuses, 2010.
- 9) International Electrotechnical Commission, IEC 61000-4-5, Surge Immunity Test, pp. 60~77, 2002.