2.5 mm² HIV에 일반화염 및 DC 단락 전류를 인가하여 생성된 기공의 정량적 분포 해석

김승삼 · 최충석^{*}

전주대학교 소방안전공학과
(2013. 1. 24. 접수 / 2013. 8. 1. 채택)

Quantitative Distribution of Created Voids by Applying General Flame and DC Short-circuit Current to 2.5 mm² HIV

Seung-Sam Kim · Chung-Seog Choi^{*}

Department of Fire Safety Engineering, Jeonju University
(Received January 24, 2013 / Accepted August 1, 2013)

Abstract : This study performed the quantitative distribution analysis of created voids to an insulator when applying general flame and DC short-circuit current to 2.5 mm² HIV (600 V Grade Heat-Resistant Polyvinyl Chloride Insulated Wires). The diameter of cross-section of HIV normal product and the radius of conductor were measured to be 3.3 mm and 1.8 mm. The exterior of HIV exposed to general flame showed severe carbonization and its interior exhibited voids created by dechlorination reaction. This study observed the characteristics that, when the short-circuit current applied for 2 seconds from a DC 12 V lead battery, the conductor and neighboring insulator were melted, causing the insulator adhering to the conductor. On average, 87 voids were created on 10 mm of the HIV. The average diameter of voids was 0.25 mm. In addition, it was found that, when the short-circuit current applied for 4 seconds, the interior of insulator in contact with conductor severely carbonized and showed exfoliation phenomenon. On average, 47 voids were created, with more voids at the bottom. The average diameter of voids was 0.20 mm. When the short-circuit current for 6 seconds, most parts of upper part of conductor was carbonized, 20 voids were created. The average diameter of voids was measured to be 0.24 mm. It could be seen that the created voids received little influence by the type of energy source and the number of created voids was reduced as the energy supply time increased.

Key Words : quantitative distribution, general flame, DC short-circuit current, HIV, dechlorination reaction

1. 서론

전기에너지는 시간의 변화에 따라 에너지가 어떻게 전달 되느냐에 따라 직류(DC; Direct Current)와 교류(AC; Alternating Current)로 구분한다. AC는 시간의 경과에 따라 일정한 주기를 가지고 그 크기와 방향을 바꾸는 전류를 말한다. 우리나라에 사용되는 교류 전압의 종류는 110 V, 220 V, 380 V, 440 V 등이 저압용 설비에 적용되며, 3.3 kV, 6.6 kV 등은 고압용 설비에 사용된다. 그리고 22.9 kV, 154 kV, 345 kV, 765 kV 등은 특별고압으로 분류하여 각각의 전압에 따른 기준을 엄격하게 적용하여 운용되고 있다. 전기 기기 및 시스템 등에 적용되는 직류 전압은 1.5 V, 3.0 V, 4.5 V, 6 V, 9 V가 제어용 전원으로 사용되며, 12V, 24V 등은 소형 차량 및 소방용 전원으로 사용된다. 또한 48 V, 96 등은 통신 시스템의 운용에 사용된다. 아울러 에너지 활용의 다변화에 따라 DC를 이용한 E-Bicycles 및 Golf Cart 등은 12~72 V가 사용되며, NEV(Neighborhood Electric Vehicle) 및 UEV(Urban Electric Vehicle) 등은 48~100 V가 사용되고

있다. 그리고 EV(Electric Vehicle) 및 PHEV(Plug-in Hybrid Electric Vehicle) 등은 100~350 V가 사용된다¹⁻⁶⁾. 특히 신재생에너지의 보급 및 정밀시스템 등이 증가함에 따라 DC의 전압 및 용량이 증가 추세를 보이고 있다. 높은 전압 및 대용량 DC의 보급 증가는 배선의 열화(劣化), 불완전한 체결에 의한 접촉(촉) 불량, 절연체의 소손에 의한 배선의 단락 등이 발생할 때 전기화재가 발생할 수 있다. 전기화재가 발생했을 때 사고의 원인 규명을 위한 연구는 주로 AC 전원을 대상으로 진행되었다. 즉, 소손된 전선의 탄화분석은 실체현미경을 이용했으며, 단락 또는 일반화염 등에 의해 용융된 전선의 단면은 금속현미경을 이용하여 구조를 해석하였다. 또한 주사전자현미경(SEM; scanning electron microscope), 에너지분산분석기(EDX; Energy dispersive x-ray spectroscopy) 및 적외선분광분석기(FT-IR; Fourier Transform Infrared Spectroscopy) 등 정밀분석기를 이용한 미시적 해석이 병행된 것으로 보고되고 있다⁷⁻¹²⁾.

본 연구에서는 2.5 mm² 600 V 제2종 비닐절연전선(HIV; 600 V Grade Heat-Resistant Polyvinyl Chloride Insulated

^{*}Corresponding Author: Chung-Seog Choi, Tel : +82-63-220-3119, E-mail: enetek@naver.com
Department of Fire Safety Engineering, Jeonju University, 303, Cheonjam-ro, Wansan-Gu, Jeonju 560-759, Korea

Wires)에 일반화염 및 DC 단락 전류 등이 인가되었을 때 소손된 절연체의 기공(void) 분포를 정량적으로 해석하여 화재원인 규명의 지식기반을 구축하는데 있다.

2. 실험조건 및 방법

DC는 전원 품질 및 절연 성능이 우수하여 정밀기기 및 고 품질 설비에 주로 사용된다. 대표적인 DC 전원이 축전지(battery)이고, 용량 및 형태에 따라 다양한 제품이 제작되어 판매되고 있다. 실험에 사용된 600 V 제2종 비닐절연전선(HIV; Hanmi Electric Wire Co., 2009)은 Table 1과 같으며, 굵기는 2.5 mm²(KS C IEC 60227)이다. 일반화염에 의한 난연성 시험은 한국산업규격 KS C 3004에 제시되어 있는 ‘고무·플라스틱 절연전선 시험방법 제4조’의 규정을 준용하였다. 연소 실험이 완료된 후의 실험 대상물의 자연소화 여부를 확인하였고, 연소 불꽃의 길이는 180 mm 이하를 유지시켰다. 즉, 구획된 공간에 지지대를 설치하여 HIV를 60°로 고정시켰다. 실험에 적용된 HIV는 100 mm이었으며, 가스 토치를 이용한 일반화염 인가는 2 s, 4 s, 6 s 각각 진행되었다. 일반화염에 의해 탄화된 HIV 절연체의 소손 패턴은 디지털 카메라(Camera D 90, 2009, Nikon, Japan)를 사용하여 분석하였다.

Table 2는 실험에 사용된 DC 12 V 납축전지(lead acid battery, BX60L, Atlaxbx Co.)의 주요 특성을 정리한 것이다. 배터리의 사용온도는 -18°C~75°C이며, 정격용량은 60 Ah이다.

Fig. 1은 실험에 사용된 HIV의 단면 및 표면을 사진으로 나타낸 것이다. HIV 단면의 직경은 3.3 mm이고, 도체(copper)의 지름은 1.8 mm인 것으로 사용하였다. 도체의 절연

Table 1. Standard for of HIV 2.5 mm² specified in KS C IEC 60227.

Cross-sectional area of Wire(mm ²)	Thickness of Insulator(mm)	Wire diameter[mm]		Resistance of insulator(MΩ · km)
		Inner	Outer	
2.5	0.8	3.4	4.1	0.009 at 90°C

Table 2. Characteristics of DC 12 V battery used in an experiment.

Size (mm)				Rated capacity (AH)	Holding capacity (min.)	Low Temp. -18(°C) Starting current (A)
Length (L)	Width (w)	High (H)	Top High (TH)			
230	172	180	200	60	100	560

Fig. 1. Photo of the cross-section of the HIV used for the test.

체는 난연성 PVC(PVC; Polyvinyl chloride resin)이었으며, 두께는 1.5 mm로 균일하게 도포된 것으로 확인되었다.

실험이 진행될 때의 온도는 18~24°C, 습도 40~60%를 일정하게 유지시켰다. 일반화염에 의한 HIV 절연체의 소손 패턴을 해석하였고, HIV 전선이 단락된 상태에서 DC 12 V 배터리의 단락 전류가 각각 2 s, 4 s, 6 s 공급되어 소손된 절연체의 기공 생성 특성을 정량적으로 분석하였다. Fig. 2는 실험의 준비 및 진행 절차를 나타낸 개략도이며, 표준작업절차(SOP; Standard Operating Procedure)를 준용하였다.

Fig. 3은 DC 12 V 납축전지로 HIV에 단락 전류를 흘리기 위해 구성한 실험 개략도이다. DC 12 V 전원은 납축전지이며, 전원의 ON/OFF는 커버 나이프 스위치(CKS; Cover Knife Switches, 2 P, 30 A, 250 V, Jinheung Electric Co., Korea)을 이용하였다.

실험이 진행될 때 전류의 통전 유무 및 전류의 세기 확인은 디지털하이테스터(Digital High Tester, 3801-50, HIOKI Co., Japan) 및 클램프 미터(Clamp on meter, High Tester 3542, HIOKI Co., Japan)를 이용하였다. DC 12 V 납축전지의 양극(+)과 음극(-)을 HIV 각각의 한 쪽에 연결하고, 다른 끝 점을 단락시킨 상태에서 실험이 진행되었다. HIV 한쪽 배선의 길이는 1,000 mm이며, 2개의 HIV를 사용하여 단락될 때 교차각(Cross angle)은 약 10.8°인 것을 알 수 있

Fig. 2. Sequential diagram for the analysis of void distribution of an insulator.

Fig. 3. Schematic diagram when applying short-circuit current to HIV from a the DC 12 V.

다. 즉, 전선의 단락 발생점 및 길이 등을 동일한 조건으로 유지함에 따라 실험 오차의 발생을 최소화 하였다.

3. 결과 및 고찰

HIV의 절연체로 사용된 PVC는 $(CH_2=CHCl)_n$ 의 구조로 되어있다. PVC는 약 $140^{\circ}C$ 에서 열분해를 시작하며, 용융점은 약 $160^{\circ}C$ 이다. PVC는 열에 의해 탈염화 반응이 생성되고, HCl 가스를 발생시킨다. 이 때 생성된 HCl 가스는 절연체에 작은 구멍들을 생성시키는데 이것을 기공(void)라고 한다. PVC는 경질 PVC(Rigid PVC)와 연질 PVC(Flexible PVC)로 분류되며 흡습성, 내유성 및 내화학성 등이 양호한 물질이다. 또한 산이나 알칼리 등에 안정하며, Table 3은 주요 특징을 나타낸 것이다¹³⁾.

Fig. 4는 실험에 적용된 HIV 절연체의 기공 특성을 분석한 지점을 나타낸 개략도이다. HIV한 쪽의 길이는 1,000 mm이며, 100 mm 마다 10 mm(9곳)을 분석하여 평균값을 산출하였다.

Fig. 5는 일반화염을 HIV에 인가하여 소손된 전선의 가로축 단면 실체사진을 나타낸 것이다. 일반화염이 HIV에 직접 노출된 시간은 2 s이었으며, 외부는 심하게 탄화되었고 부풀어 오른 특성을 보였다. 그러나 내부는 탈염화 반응(Dechlorination reaction)에 의해 생성된 기공이 표면 쪽에 많이 발견되었고, 도체에 가까운 안쪽은 거의 없는 것을 알 수 있다. 분석된 10 mm에서 생성된 기공의 수는 평균 72개 이었고, 평균 직경은 약 0.10 mm로 측정되었다.

Fig. 6은 동일한 조건에서 일반화염을 HIV에 4 s 동안

Table 3. Characteristics of rigid PVC and flexible PVC.

Characteristics	Rigid PVC	Flexible PVC
Density(g/cm ³)	1.3-1.45	1.1-1.35
Thermal conduction rate(W/m · K)	0.14-0.28	0.14-0.17
Yield strength(MPa)	31-60	10-25
Young's modulus	490,000	-
Flexural strength	10,500	-
Compression strength	9,500	-
Coefficient of thermal expansion(liner) (mm/mm · °C)	5×10^{-5}	-
Vicat temperature(°C)	65-100	Not recommended
Resistivity(Ω m)	1,016	1,012-1,015
Surface resistivity(Ω)	1,013-1,014	1,011-1,012

Fig. 4. Position and section at which voids of the damaged HIV are measured.

Fig. 5. Photo of the cross-section of the HIV damaged by general flame for 2 seconds.

Fig. 6. Photo of the cross-section of the HIV damaged by general flame for 4 seconds.

인가하였을 때 생성된 것으로 절연체 외부의 탄화는 더욱 심한 것을 알 수 있다. 생성된 기공의 개수는 평균 52개로 감소하였고, 직경의 평균은 0.36 mm로 증가하였다.

Fig. 7은 동일한 조건에서 일반화염을 6 s 동안 인가하였을 때 생성된 기공을 나타낸 실체사진이다. 일반화염이 직접 공격한 부분은 더욱 탄화가 심화되었고, 절연체의 내부는 도체와 밀착된 것을 알 수 있다. 또한 생성된 기공의 개수는 현저히 줄어 평균 17개 이었으며, 직경의 평균은 1.9 mm 정도로 측정되었다. 즉, 일반화염의 인가 시간의 변화에 따라 절연체의 탄화, 용융, 도체와 부착 등의 차이가 있는 것을 알 수 있었다. 또한 기공의 생성 개수는 감소하였고, 평균 직경은 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 HIV에서 화염을 제거하면 연소의 진행이 즉시 중단되는 특성을 보였다.

Fig. 8은 Fig. 3과 같은 조건에서 DC 12 V 배터리로 단락 전류를 2 s 동안 인가하여 소손된 HIV의 가로축 단면 실체사진이다. 도체와 인접한 절연체가 용융되어 도체와 밀착된 것을 알 수 있고, 다수의 기공이 확인된다. 도체의 상부에 생성된 기공의 직경이 하부의 것보다 큰 것을 알 수 있고, 하부는 개수가 많은 것으로 확인된다. 10 mm에 생성된 기공은 평균 87개 이었고, 평균 직경은 0.25 mm로 측정되었다.

Fig. 9는 단락 전류를 4 s 동안 인가하여 소손된 HIV의 가로축 단면 실체사진이다. 도체와 접촉되어 있는 내부가 심하게 탄화되었고 박리된 것을 알 수 있다. 그리고 정상 제품의 절연체는 두께가 균일하였으나 소손된 절연체는 상부가 얇아진 것을 확인할 수 있었다. 또한 기공은 평균 47

Fig. 7. Photo of the cross-section of the HIV damaged by general flame for 6 seconds.

Fig. 8. Photo of the cross-section of the HIV damaged by applying short-circuit to HIV for 2 seconds with the DC 12 V.

Fig. 9. Photo of the cross-section of the HIV damaged by applying short-circuit to HIV for 4 seconds with the DC 12 V.

개로 하부에 더 많이 생성되었고, 평균 직경은 0.20 mm로 측정되었다.

Fig. 10은 단락 전류를 6 s 동안 인가하여 소손된 HIV의 가로축 단면 실체사진이다. 도체의 상부는 대부분 탄화되어 정상상태의 형태를 확인할 수 없었으며, 도체와 대부분 분리된 것을 알 수 있다. 또한 생성된 기공은 평균 20개였으며, 평균 직경은 0.24 mm로 측정되었다.

Table 4는 실험을 통해서 확인된 기공의 평균 개수와 평균 직경을 각각 나타낸 것이다. 일반화염에 의해 소손된 HIV 절연체의 기공 개수는 감소하였고, 평균 직경은 감소하는 것을 알 수 있다. 그리고 DC 12 V 배터리를 이용한 단락 실험에서는 통전시간이 길면 기공의 개수도 증가했으나 기공의 직경 변화는 상대적으로 적게 발생한 것을 알 수 있었다.

Fig. 11은 일반화염과 DC 12 V의 단락 전류에 의해 생성된 기공의 개수, 직경과 시간의 관계를 나타낸 것이다. 기공의 생성 개수는 에너지원의 종류에 영향이 적은 것으로 확

Fig. 10. Photo of the cross-section of the HIV damaged by applying short-circuit to HIV for 6 seconds with the DC 12 V.

Table 4. Number and diameter of voids confirmed through the test.

Experimental condition	Times (sec)	Number of Voids (ea)	Diameter of Voids (mm)
General flame	2	72	0.10
	4	52	0.36
	6	17	1.9
Electric short	2	87	0.24
	4	47	0.19
	6	20	0.24

Fig. 11. Relation between the number of created voids, their diameter and short-circuit current applied time, according to energy source.

인되었고, 에너지의 공급 시간이 증가하면 기공의 개수는 감소하는 경향을 나타내고 있다. 그리고 DC 12 V 배터리에 의해 소손되었을 때 기공의 생성 개수는 변화가 완만한 것으로 확인되었으나 일반화염에 의해 소손되었을 때는 특정 순간에 급격히 증가하는 것으로 확인되었다.

4. 결론

본 연구에서 2.5 mm² HIV에 일반화염 및 DC 단락전류를 인가하였을 때 생성되는 절연체의 기공 분포를 정량적으로 해석하였다.

1) HIV에 일반화염이 직접 공격된 외부는 탄화가 심하게

진행되었고, 내부는 탈염화 반응에 의한 기공 생성을 확인할 수 있었다. 그리고 일반화염의 인가 시간의 변화에 따라 절연체의 탄화, 용융, 도체와 부착 등의 차이가 있었다. 기공의 생성 개수는 감소하고 직경은 증가하는 것을 알 수 있었다.

2) DC 12 V를 HIV에 2 s 동안 인가하였을 때 도체와 인접한 절연체가 용융되어 도체에 부착되는 특성을 보였다. 도체의 상부에 생성된 기공의 직경이 하부의 것보다 큰 것을 알 수 있었고, 하부는 개수가 많았다. 또한 10 mm에 생성된 기공의 개수는 평균 87개 이었고, 평균 직경은 0.25 mm이다.

3) DC 12V를 HIV에 4 s 동안 인가하였을 때 도체와 접촉되어 있는 내부가 심하게 탄화되었고 박리된 것을 알 수 있었다. 또한 기공의 개수는 평균 47개로 하부에 더 많이 생성되었고, 평균 직경은 0.20 mm이다.

4) DC 12V를 HIV에 6 s 동안 인가하였을 때 도체의 상부는 대부분 탄화되어 정상상태의 형태를 확인할 수 없었으며, 도체와 대부분 분리된 것을 알 수 있었다. 또한 생성된 기공의 개수는 평균 20개였으며, 평균 직경은 0.24 mm이다.

5) 기공의 생성 개수는 에너지원의 종류에 영향이 적으며, 에너지의 공급 시간이 증가하면 기공의 생성 개수는 감소하는 경향이 있다. 그리고 DC 12 V에 의해 소손되었을 때 기공의 생성 개수는 변화가 완만하였으나 일반화염에 의해 소손되었을 때는 특정 순간에 급격히 증가하는 것을 알 수 있다.

References

- 1) C. S. Choi et al, "Introduction to Electrical Circuit", Honghwa Technology Publishing Co., pp. 12~18, 138~139, 2012.
- 2) C. S. Choi et al, "Firefighting and Electrical Installation", Honghwa Technology Publishing Co., pp. 137, 148, 2012.
- 3) K. Y. Song, "Transmission and Distribution System", pp. 30, 524, Dongilbooks, 2008.
- 4) Robert L. Boylestad, "Introductory Circuit Analysis", Macmillan Publishing Co., pp. 39~51, 2005.
- 5) M. H. Sunwoo et al, "Automotive Mechanics", pp. 245~249, Intervision Publishing Co., 2004.
- 6) C. S. Choi, H. W. Kim, K. S. Lee, Y. S. Lim, C. H. Lee, and J. H. Chung, "Electrical Fire Engineering", Honghwa Technology Publishing Co., pp. 15~19, 189~224, 2004.
- 7) S. S. Kim and C. S. Choi, "A Study on the Quantitative Assessment of HIV Insulation Void Created by Electric Short of DC 12 V", Fall Annual Conference, Journal of the Korean Society of Safety, p. 48, 2012.
- 8) C. S. Choi and H. K. Kim, "Variation of Carbonization Pattern and Crystal Structure of Polyvinyl Chloride Wire Under the Thermal Stresses", The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 57P, No. 3, pp. 332~337, 2008.
- 9) C. S. Choi, "The Properties Analysis of 600 V Grade Polyvinyl Chloride Insulated Wire with Variation of Thermal Stress", Korean of Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 15, No. 1, pp. 108~115, 2001.
- 10) C. S. Choi, H. K. Kim, and D. O. Kim, "A Study on the Characteristics Analysis of Strands Melted by Over Current", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 19, No. 1, pp. 60~65, 2004.
- 11) C. S. Choi, H. K. Kim, and K. M. Shong, "A Study on the Short-Circuit Characteristics of Vinyl Cords Damaged by External Flame", Korean of Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 18, No. 4, pp. 72~77, 2004.
- 12) C. S. Choi, K. S. Lee, and D. C. Lee, "Analysis of Compositive Variation with Thermal Deterioration for 600 V Grade Heat-Resistant Polyvinyl Chloride Insulated Wires", The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 49C, No. 1, pp. 8~12, 2000.
- 13) W. V. Titow, "PVC technology", Elsevier Applied Science Publishers, p. 857, 1186, 1191, 1194, 2011.