

연면 트래킹에 의한 탄화 거동

(Carbonization Behavior due to Surface Tracking)

정연하* · 장태준 · 송길목 · 노영수 · 곽희로

(Yeon-Ha Jung · Tae-Jun Jang · Kil-Mok Shong · Young-Su Roh · Hee-Ro Kwak)

요 약

본 논문에서 전극간 표면누설에 의한 탄화도전로의 형성과 방향성에 대해 연구하였다. 표면에서 트래킹의 특성은 노출된 충전부사이에서 절연파괴되었다. 고속카메라시스템을 이용하여 전극간 방전과 지락, on/off 서어지에서 발생하는 아크성장 메커니즘을 촬영하고, 결과를 분석하였다. 향후 아크제어를 통한 에너지 이용기술의 적용이 기대된다.

Abstract

In this paper, we are studied on the direction and formation of carbonized conductive path according to surface leakage current between electrodes. The characteristics of the tracking as surface is broken down between exposed live parts. Using the HSIS(high speed imaging system, 100,000[fps], redlake ltd., USA), it took photographs by arc growth mechanism occurred in on/off surge, ground fault and discharge between electrodes. Then the results was analyzed. Hereafter, it expected effects that application of energy utility technology through the arc control.

Key Words : Surface tracking, Carburized conductive path, HSIS

1. 서 론

국내 환경에 있어서 삼면이 바다로 둘러 싸여 염해가 심하며, 황사현상과 같은 자연현상이 주기적으로 발생하고 있고, 일부 도시의 경우 심각한 공해문제 등을 안고 있다. 따라서 전기설비의 유지보수와 관리적 측면은 매우 열악한 실정이다. 염해, 황사, 공

해먼지 등의 공통점은 전기설비의 표면에 장시간에 걸쳐 열화를 진전시키는 것으로 절연재료의 표면을 따라 누설전류가 흐르면 일정시간이 지나 불꽃방전과 건조대를 반복하면서 절연파괴가 발생한다. 따라서 절연파괴에 의해 전극과 전극사이의 절연재가 도전성을 가진 물질로 변하게 된다. 이는 절연재료의 탄화도전로가 형성되어 일종의 트랙(track)을 형성하는 것으로 전극과 전극사이에서 전류가 쉽게 이동할 수 있도록 도전로를 만들어낸다[1-2].

IEC에서도 이에 대한 실험기준에 대해 명확히 설명하고 있다. 특히 IEC 50587과 IEC 60112의 경우에

* 주저자 : 한국전력공사 전력연구원
Tel : 042-865-5917, Fax : 042-865-5904
E-mail : mywendy@kepco.co.kr
접수일자 : 2006년 8월 11일
1차심사 : 2006년 8월 17일, 2차심사 : 2006년 11월 22일
심사완료 : 2006년 12월 6일

는 절연재료를 평가하는 기준으로 이용되고 있다. 또한 실험대상의 형상은 개질표면에 방전로의 형성을 최적화 할 수 있는 IEC 61621에 나타나 있는 기준 적용하였다. 최근에는 다양한 실험조건과 재료 및 환경에 적합한 형태의 실험조건을 응용한 연구결과들이 발표되고 있다[3].

저전압에서는 열가소성수지(thermoplasticity resin)에 대한 내트래킹성이 강한 반면 열이나 자외선 등에 의해 장시간 노출되면, 경화되는 단점을 가지고 있다. 최근에는 충전제(filler)의 개발로 많은 부분 트래킹에 대한 우수한 재료가 등장하였으나, 기존의 설비 또는 온도, 습도, 자외선, 화학적 영향, 공해, 먼지 등의 외부 영향에 의한 재료의 변질이 나타나고 있다. 선진외국의 연구에서는 방전메커니즘과 더불어 재료의 특성변화 등을 분석기기에 의해 해석하여 재료 평가에 이용되는 경우가 많다[4-5].

본 장에서는 트랙을 따라 이동하는 전류의 특성과 절연재료의 표면에 방전에 의한 메커니즘을 입증하고, 연면방전의 거동에 대해 분석하였다.

2. 본 론

2.1 연면트래킹과정

본 연구는 절연재료의 표면에 트래킹이 될 수 있

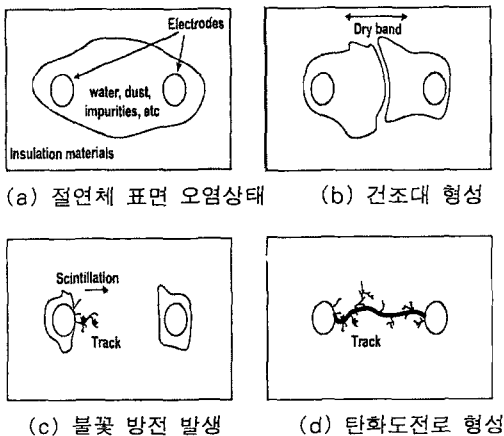


그림 1. 탄화도전로 형성과정
Fig. 1. Formative process of conductive path

도록 구성하여 탄화도전로를 형성하고 있는 아크 메커니즘과 거동에 대한 고찰로서 그림 1은 아크에 의한 탄화도전로 형성 과정을 보여준다.

(a)는 절연재료의 표면에 있는 전극사이에 오염물질이 있거나, 외부 요인에 의해 누설전류가 흐를 수 있는 조건을 나타낸 것이다. (b)는 건조대가 형성되고 확장되는 형태를 나타낸 것으로 전류에 의한 전자의 이동으로 열에너지가 발생하여 수분이 증발하고 표면의 온도가 상승한다. (c)는 전극 주변에 탄화도전로가 형성되고 미소불꽃방전이 진행된다. 이로 인해 전극사이의 절연이격거리는 탄화도전로가 형성되어 좁아지는 과정을 갖는다. (d)는 전극과 전극사이에 탄화도전로가 형성된 것을 나타낸 것으로 연면트래킹에 의해 전류가 탄화도전로에 의한 자국을 남기며 진행된 형태를 알 수 있다[6]. 일반적으로 전류는 항상 작은 저항로에 의해 이동된다. 이러한 과정을 통해 절연재료에 탄화도전로가 형성된다[7].

그림 2는 전극간 방전이 진행된 후 형성된 방전로의 개략도와 그 구분을 나타낸 것이다. 주 방전로는 전극간 이어진 가장 굵은 탄화도전로를 의미하며, 완전 방전이 이루어진 후 전류가 흐르는 주 통로를 의미한다. 방전로가 형성되면서 주방전로 다음으로 굵기가 주 방전로에 비해 가늘게 형성된 것을 가지방전로(Branch 1)로 구분하였다. 1차 가지방전로를 중심으로 가지형태로 형성된 탄화도전로는 2차 가지방전로(Branch 2)로 구분하였다. 따라서 3차 가지방전로(Branch 3)는 2차 가지 방전로보다 가늘고 2차 가지방전로를 중심으로 형성된 것을 의미한다.

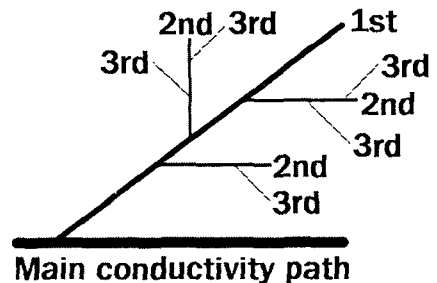


그림 2. 방전로 가지의 구분
Fig. 2. Classification of discharge path branches

2.2 실험방법

직경 10[mm]의 봉전극 형태를 제작하여 절연재료에 7[mm], 15[mm], 25[mm], 40[mm]의 일정한격으로 실험하였다. 그림 3은 전극을 고정한 상태를 촬영한 것이다. 이때 이용된 절연재료는 저전압 또는 고전압에서 패넬로 많이 이용되는 페놀수지의 베이클라이트(bakelite)를 이용하였다.

실험은 IEC 60112과 IEC 61621에 나와 있는 방법을 인용하였으며, 가속열화가 될 수 있는 조건을 만들기 위해 실험순서는 5[wt%]의 NaCl 수용액을 표면에 약 1[mm]의 두께로 도포한 후 전원을 공급하였다. 전원은 교류 220[V]의 전원을 이용하였으며, 탄화도전로가 형성되어 사고가 전원공급 측에 미치는 영향을 최소화하기 위해 1 : 1 절연변압기를 전원공급 측에 설치하였다.

또한 실험규격에도 언급되어 있듯이 회로의 단락을 방지하기 위한 안전저항을 넣어 가변하도록 구성하였다. 그림 4는 회로와 자료 수집을 위한 고속카메라가 설치된 형태의 실험 구성에 대한 개략도를 나타낸 것이다.

실험을 통해 고속카메라를 이용하여 방전까지의 과정을 이미지로 촬영하였고, 탄화도전로가 형성되어 완전단락에 이르는 시간 측정, 극간 거리에 따른 트래킹 과정과 탄화도전로의 형성, 탄화형태 등을 분석하였다. 실험은 동일조건에서 10회 반복하여 최고치와 최저치를 제외한 평균자료를 이용하였다.

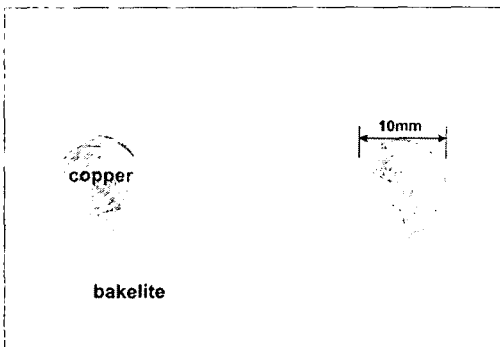


그림 3. 전극을 설치한 절연재료의 외형
Fig. 3. Insulation material with electrodes

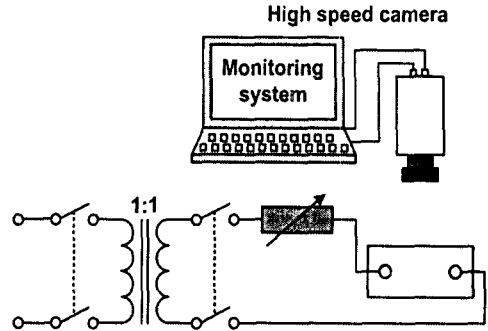


그림 4. 연면방전을 위한 실험 개략도
Fig. 4. Schematics of experimental apparatus

2.3 실험결과 및 분석

2.3.1 전극의 이격거리에 따른 방전시간 및 아크과정

전극의 이격을 7[mm], 15[mm], 25[mm], 40[mm]의 길이로 각각 실험하여 그림 4와 같은 결과를 알 수 있었다. 그림에서 알 수 있듯이 전극의 길이가 멀어질수록 방전시간이 2차원적으로 증가하였다. 또한 방전거리가 멀어지면 방전시간은 일정하지 않은 것을 알 수 있었다. 그리고 극간 거리에 따른 연면트래킹의 특성에 있어서 고속카메라에 의해 촬영된 연면트래킹을 보면, 탄화도전로를 형성하는 위치가 다를 수 있다.

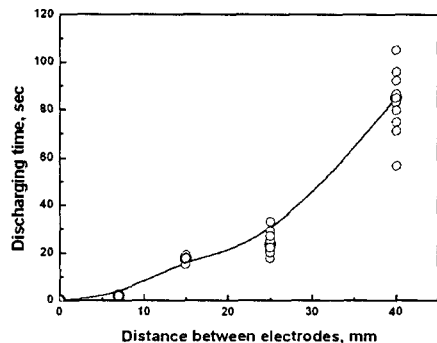


그림 5. 전극사이의 거리 대 트래킹시간 상관곡선
Fig. 5. Tracking time by distance

그림 6은 극간 거리에 따른 각각의 트래킹 발생 상태를 고속카메라로 촬영한 것이다. (a)는 트래킹 거리가 7[mm]일 때의 촬영한 것으로 극간거리가 짧고,

에너지의 방출량이 많아 불꽃이 커진 것을 확인하였다. 도전로가 형성된 시간은 평균 2.1[sec] 동안 진행되었다. (b)는 트래킹거리가 15[mm]의 것으로 주트래킹로 외에 주위로 다른 탄화도전로가 형성되고 있음을 확인할 수 있다. (c)는 25[mm]의 극간거리에서 트래킹된 것으로 절연저항이 전기에너지의 흐름에 의해 줄열에 의한 탄화도전로가 형성되면서 저항이 급격히 낮아지고 이로 인한 전기에너지의 흐름이 폭주하여 열에너지로 전환되는 반복과정을 나타냈다. (d)는 40[mm]의 극간거리에서 탄화도전로가 형성되면서 트래킹된 것을 나타낸다.

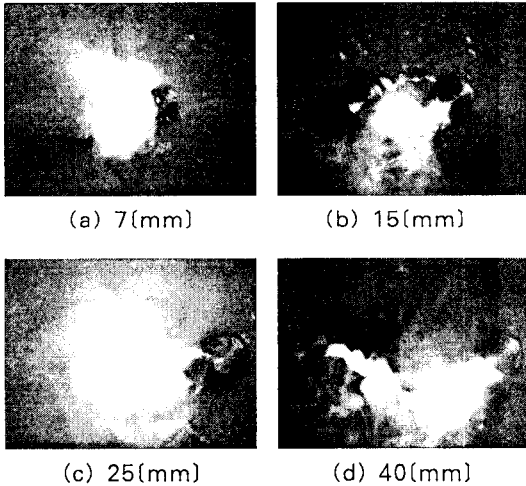


그림 6. 극간 거리에 따른 방전특성
Fig. 6. Tracking characteristic with gap distance

2.3.2 탄화도전로의 거동 분석

그림 7은 그림 6에서 발생한 탄화도전로 형성과정이 진행된 후의 생성된 탄화도전로를 촬영한 것이다. 극간 거리에 따른 탄화도전로를 확대한 것으로 극간 주트래킹로를 중심으로 분기된 도전로가 극간 거리가 길어질수록 많아지는 경향을 보였다. 절연저항은 약 3.2[Ω]에서 55[Ω]까지 나타났으나, 일정하지 않았다.

그림 8은 광학현미경을 이용하여 탄화도전로 일부를 확대한 것으로 전극 사이의 거리가 7[mm]인 (a)의 경우 주 도전로를 중심으로 1차 가지는 약 90[°]의 각도로 성장하였고, 2차 가지에서 분기된 것은 각

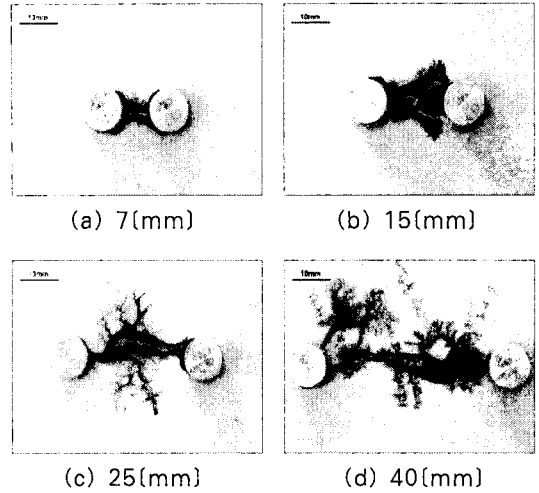


그림 7. 극간 거리에 따른 탄화도전로 형성
Fig. 7. Carburized conductive path with gap distance

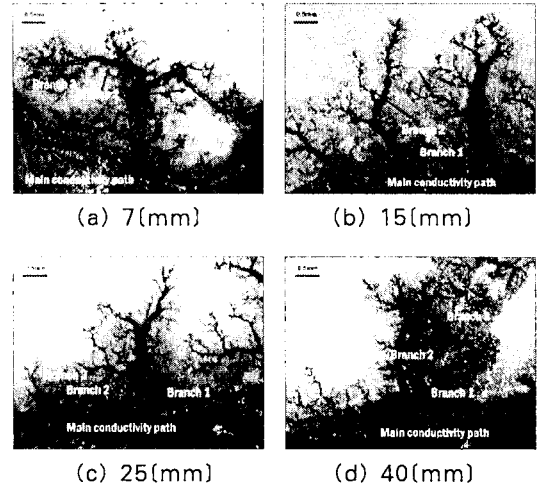


그림 8. 극간 거리에 따른 탄화도전로
Fig. 8. Carburized conductive path for gap distance

각의 전극 방향으로 형성되었다. 3차 가지는 2차 가지를 중심으로 약 45[°]의 일정한 각도로 생성되었다. (b)는 15[mm]의 전극 거리에서의 탄화도전로를 확대한 것으로 주 방전로를 중심으로 분기 가지가 형성된 것을 확인할 수 있다. 분기된 도전로의 성장은 성장각도가 기울어진 형태를 확인할 수 있으며, 2차 가지에서는 대부분 1차 가지가 기울어진 방향으

연면 트래킹에 의한 탄화 거동

로 생성하여 성장하는 것을 확인할 수 있다. 3차 가지에서는 일정한 각도의 균형을 가지고 나타나는 것을 확인하였다. 이는 주트래킹로를 중심으로 나타난 분기가 1차 가지의 기울어진 각도에 의해 2차 가지의 생성과 성장을 지배하고 있으며, 가지가 분기될 수록 이러한 영향은 적은 것으로 판단된다. (c)는 25[mm]의 전극거리를 유지하여 누설전류에 의한 탄화도전로를 진전시킨 것이다. 1차 가지는 타원 형태로 성장하였는데 방향은 전극의 위치에서 가까운 방향으로 진행된 것을 확인하였다. 이는 1차 가지의 기울어짐에 따라 성장하는 방향이 결정되어 있음을 알 수 있다. (d)는 40[mm]의 전극거리를 유지한 채 탄화도전로를 형성하였다. 주트래킹로 아래 부분의 가지들도 위에 설명한 가지 등과 비슷한 경향을 보였다.

주 트래킹로를 중심으로 1차 가지의 경우 거의 수직인 형태로 성장하였으나 우측으로 약간의 기울어진 상태를 보이며 이로 인해 2차 가지의 성장은 대부분 우측으로 성장하였다. 3차 가지는 2차 가지를 중심으로 방사 형태로 성장하였다.

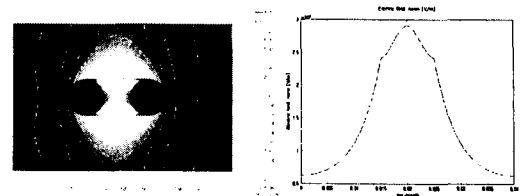
2.4 전계해석시뮬레이션

그림 9에서는 전극 거리에 따른 전계의 분포를 유한요소법을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 또한 전극 사이의 전계의 세기를 그래프로 나타내었다. 전극 사이 거리가 짧을수록 전계의 세기가 크지만 전극 사이의 중앙에 집중하는 것을 확인하였다. 그러나 거리가 멀어질수록 전극 중앙의 전계의 세기는 작아 지지만 전극 주변까지 전계가 넓게 분포하는 것을 보았는데 이것은 에너지가 절연물에 전체적으로 퍼지는 것으로 앞 절의 탄화도전로 가지들이 많이 발생하는 것과 연관성이 깊은 것으로 판단된다.

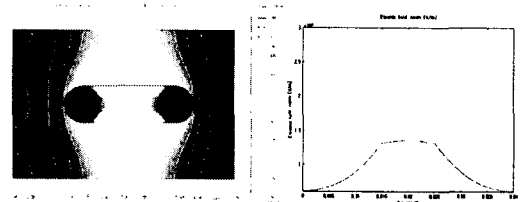
3. 결 론

본 연구에서는 연면 트래킹의 특성에 대한 실험하여 다음과 같이 요약하였다.

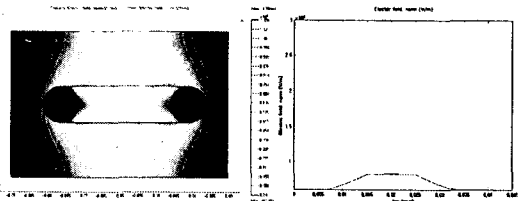
(1) 탄화도전로의 절연저항을 측정한 결과, 약 3.2 [Ω]에서 55[Ω]까지 다양하게 나타났으며, 절연저항



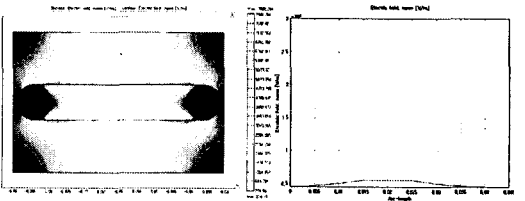
(a) 7[mm]



(b) 15[mm]



(c) 25[mm]



(d) 40[mm]

그림 9. 전극 거리에 따른 전계 분포
Fig. 9. Electrical field distribution with gap distance

이 매우 낮아진 것을 확인하였다.

(2) 분기가지의 성장방향은 1차 가지와 2차 가지에서 뚜렷한 방향성을 가지고 있는 것을 확인하였고, 1차 가지는 전극이 가까운 위치에서 먼 쪽의 방향으로 성장하였으며, 2차 가지는 1차 가지의 기울어진 방향으로 대부분 성장하였다.

(3) 성장 방향성은 극간 거리가 가까울수록 방향성이 일정하였으며, 극간 거리가 멀수록 2차 가지에

서 방향성을 가지는 것으로 나타났다.

(4) 전극 거리에 따른 전계 해석 결과 거리가 짧을 수록 전계의 세기가 크지만 전극 사이의 중앙에 집중되고 멀수록 넓게 퍼져 탄화도전로가 넓게 발생하는 것을 확인하였다.

본 연구는 산업자원부(MOCIE) 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] H. Davy, Elements of Chemichal Philosophy, Vol.1, Smith and Elder, Lodon, p152, 1812.
- [2] M. Steenbeck, Untersuchungen am Lluftlichtbogen in Schwerefrenen Raum, Z. Tech Phys. 33:593, 1937.
- [3] G. Busz-Peuchetr and W. Finkelnburg, Die Abhangigkeit Anodenfalles von Stromstarke end Bogenlange bei Hochtemperaturbogen, Z. Phys. 140, pp540-546, 1966.
- [4] W. R. Wilson, High-Current Arc Erosion of Electric contact Material, AIEE Trans. 74(Part III), pp657-664, 1955.
- [5] J. V. R. Heberlein and E Pfender, Investigation of the Anode Boundary Layer of an Atmospheric Pressure Argon Arco, IEEE Trans. Plasma Sci. PS-8, p252, 1980.
- [6] D. H. Chen and E. Pgender, Modelling of the Anode Contraction Region of High Intensity Arcs, IEEE Trans. Plasma Sci. PS-8, p252, 1980.
- [7] H. A. Dinulescu and E Pfender, Analysis of the Anode Boundary Layer of High Intensity Arcs, J. Appl. 51, p3149, 1980.

◇ 저자소개 ◇

정연하 (鄭蓮賀)

1980년 3월 6일생. 송실대학교 전기제어시스템공학부 졸업. 송실대학교 졸업(석사). 현재 한국전력 전력연구원 일반연구원.

장태준 (張太俊)

1976년 8월 8일생. 송실대학교 전기제어시스템공학부 졸업. 송실대학교 졸업(석사).

송길목 (宋佶穆)

1967년 3월 31일생. 1994년 송실대학교 전기공학과 졸업. 2003년 동 대학원 전기제어시스템공학과 졸업(석사). 2006년 현재 동 대학원 박사과정 수료. 1996년~현재 한국전기안전공사 부설 전기안전연구원 설비안전연구그룹 선임연구원.

노영수 (盧永秀)

1961년 4월 1일생. 1984년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1986년 서울대학교 전기공학과 졸업(석사). 미국, University of California, Davis 졸업(박사). 현재 송실대학교 전기제어시스템 공학부 조교수.

곽희로 (郭熙魯)

1942년 3월 1일생. 1967년 서울대 전기공학과 졸업. 1978년 호주 New South Wales 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1986년 MIT Visiting Scientist 현재 송실대 전기제어시스템공학부 교수 및 부총장.