한국화재 · 소방학회, 제16권 제1호, 2002년
[논 문]

T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.
Vol. 16, No. 1, 2002

화재발생에 따른 연소화염이 공기의 절연내력에 미치는 영향

Influence of the Combustion Flame on the Dielectric Strength of an Air Gap due to Fire Occurrence

김인식 · 하장호*†

In-Sik Kim · Jang-Ho Ha*†

경일대학교 전기공학과 교수
*삼척산업대학교 겸임교수
(2002. 01. 16. 접수/2002. 02. 06. 채택)

요 약

가공 전력선로 아래에서 화재가 발생되면 전력선은 예기치 않은 섬락사고가 세계 여러나라에서 관측되고 있다. 본 연구에서는 화재의 발생으로 연소화염이 존재할 때, 주변 공기의 절연내력에 미치는 화염의 영향을 알아보기 위해 모의된 조건에서 여러 가지 실험을 행하였다. 침대평판, 구대평판 및 봉대평판 전극을 수직배치한 경우, 교류 및 직류 섬락전압 특성을 조사하였다. 실험결과, 구대평판 갭의 경우, d=1 cm 및 2 cm일 때 교류섬락 전압의 상대값은 23.5% 및 30.4%이며, d=4 cm인 경우는 37.8%인 것으로 나타났으며, 화염이 없는 경우에 비해 평균 33.0%인 것으로 나타났다. 직류전압 인가시는 화염이 없는 경우, 부극성의 섬락전압이 정극성보다 높았으나, 화염이 존재할 경우는 반대로 정극성이 부극성 전압보다 높은 것으로 나타났다.

ABSTRACT

Occurring fire or burning bushes beneath overhead power lines have caused system disturbances in many countries. In this study, various tests in the simulated condition of power lines were conducted so as to investigate the reduction in insulation strength caused by combustion flame. Characteristics of the ac and dc flashover voltages in the vertical needle-plane, sphere-plane and rod-plane electrode system were investigated when the combustion flames were present near the high-voltage electrode. As the results of an experimental investigation, It was found that the average reduction characteristics of flashover voltages with the sphere-plane system, in comparison with the no-flames case, were about 1/3 times when the ac voltages were applied.

Keywords : Combustion flames, Flashover voltage, Air gap

1. 서 론

오늘날 현대문명의 발전과 산업경제의 발달은 전기에너지의 활용에 있다고 해도 과언이 아닐 것이다. 산업사회가 발달함에 따라 전기 에너지의 수요는 해마다 증가하고 있으며, 이러한 전기 에너지를 경제적으로 수송하기 위해서 전력선의 고전압 · 대용량화는 불가피하게 되었다. 전력선의 사고로 인한 정전사태는 계통의 경제성, 신뢰성 및 안정도의 관점에서 과거보다 더욱 주요한 관심의 대상이 되고 있다. 따라서 전력계통의 운용시에는 무엇보다 정전사고에 대한 대책과 그 예방이 중요하며, 나아가 사고 횟수를 줄이기 위해 사고의 원인규명이 가장 기본적인 요소가 되고 있다.

전력선의 정전사고 원인중에서 자연현상에 기인한 것으로는 크게 낙뢰와 화재로 구분되고 있다. 낙뢰는 주로 하절기에 많이 발생하고 있으나, 동절기에는 건조한 기후로 인해 화재에 의한 사고가 빈번히 일어나고 있다. 선로의 절연내력에 영향을 미칠 수 있는 고온화염의 형태로서는 거대한 산불화재로부터 전력선로 아래의 쓰레기 소각에 이르기까지 매우 다양하다. 이

† E-mail: yeunguniv@hanmail.net

러한 고온의 화염이 존재하면, 화염 상부에 있는 전선로는 절연내력이 크게 저하되어 전력선의 선간 또는 전력선과 대지간에 섬락사고를 일으킬 수 있는 조건을 형성할 수 있으므로 계통의 신뢰도 측면에서 매우 중요한 문제가 되고 있다.

외국의 경우 청명한 날씨에도 불구하고, 간혹 지락사고로 추정되는 고장이 초고압 장거리 송전선로에서 관측되어 왔다. 이러한 불명확한 정전사태는 주로 송전선로 아래에서 산불이 일어난 경우나, 잡초, 목재 또는 쓰레기 더미를 태울 때 일어난다. 비록 선로도체의 이격거리 즉, 클리어런스(clearance)를 송전전압의 섬락특성에 대해 충분히 여유있게 설계하더라도 선로부근에 화염이 존재하면 초고압 송전선로는 정전사태를 야기할 수 있음을 보고하고 있다.[1,2] 이때 대지간의 섬락시에는 전력선 구조물 부근에 순간적으로 높은 지락전류를 수반하기 때문에 화재를 진압하는 소방관에게도 매우 위험한 상황에 노출될 가능성이 있다.

지금까지 대기압 공기 또는 각종 기체의 절연파괴현상에 관해서는 J. M. Meek, H. Raether 등을 비롯한 여러 연구자에 의해 많은 연구가 수행되어 왔다. 그 후 산업 기술의 발달과 함께 특수한 환경에서 사용되는 전력기기(예로서 전기집진기, MHD발전, 초전도 및 극저온기기 등)들이 개발되면서, 이와 같은 고온 또는 극저온의 상태, 즉 특수 분위기의 기체 절연파괴현상에 대한 연구가 최근 많이 발표되고 있다.[3-5]

화염 자체의 전기적 특성에 대해서는 지금까지 많은 연구가 수행되어 왔으나, 이들 연구의 대부분은 각종 화염에 대한 자체의 임피던스 특성이나, 전위분포에 따른 화염의 저항율 및 전압·전류 특성 등 물리적 현상에 관해 주로 보고하고 있다. 예를 들면, K. Koyama 등은 MHD발전에 적용하기 위해 칼륨 등을 시드(seed)한 상태에서 화염의 도전율을 임피던스 변화법으로 측정하였으며,[6] H. Kiwaki 등은 버너를 전극으로 하여 교류 브릿지를 사용하여 화염의 도전율을 측정하였다.[7] 그러나 고전압 및 방전 공학적 측면에서 화염의 존재에 의한 플래시오버 전압의 저하 즉, 금속 전극과 화염사이의 섬락특성에 대한 연구는 지금까지 거의 발표되지 않고 있어 연구의 필요성을 느낀다. 특히, 대전력을 수송하는 전력선로 아래에서 화재가 발생한 경우에는 선로의 절연 특성뿐만 아니라, 계통 전체의 신뢰도 유지에 대한 영향을 미치므로 이에 대한 기초연구가 요망되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 화재의 발생으로 연소화염이 존재할 때, 주변 공기의 절연내력에 미치는 화염의 영향을 알아보기 위해 침대평판, 구대평판 및 봉대평판 전극을 구성하였을 때 교류 및 직류전압에 대한 섬락전압 특성을 조사하였다. 그리고 연소화염이 있을 때와 없을 때의 섬락전압을 측정하고 이를 상호 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

그림 1은 실험장치의 개략도를 나타내었다. 실험 조건에 따라 상부의 침전극은 구전극 또는 봉전극을 사용하였으며, 전극의 재질은 모두 스테인레스강을 사용하였다. 전극의 형상으로서 침전극인 경우 선단각은 약 30°이며, 구전극은 직경 50 mm인 표준전극을, 봉전극인 경우는 직경 10 mm인 평단봉을 사용하였다.

한편, 스테인레스강으로 제작된 접지측 전극은 직경 150 mm, 두께 10 mm 평판전극을 사용하였다. 평판전극의 가장자리는 곡률 반경 r=5 mm로서 설계하여 고전압에 의한 전계의 집중 현상을 방지하였다. 본 실험에서 교류 고전압은 용량 3 kVA인 고전압 발생장치(High Voltage Generator. 일본, Matsunaga Mfg. Co. Ltd.)를 사용하였다. 이 장치는 1차 입력전압 220 V, 주파수 60 Hz, 2차 출력전압은 50 kV이다.

직류 고전압은 교류 고전압을 정류하여 사용하였으며, 정류장치는 실리콘정류기(일본, Tokyo Transformer Co. Ltd.)를 이용하였다. 그리고 고전압의 측정은 고전압프로브(High Voltage Probe. 분압비 5000:1)와 디지털 오실로스코프(미국, LeCroy Co., type 9350AL)를 사용하였으며, 고압프로브는 그림 1에서 R_1, R_2로 각각 나타내었다. 그림에서 방전에 의한 전극의 손상을 방지하기 위해 보호용저항 R_L=50 kΩ을 삽입하였다. 오실로스코프를 이용하여 방전전류를 관측하기 위해

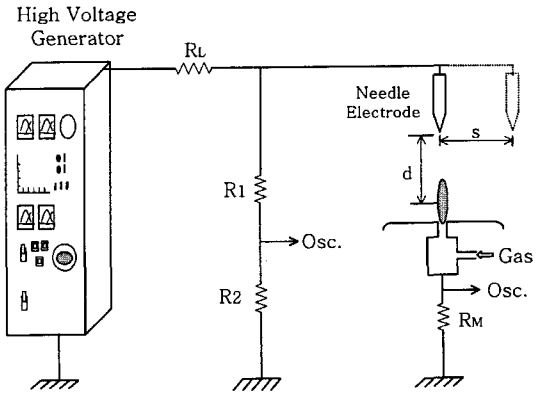


Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup.

본 실험에서는 측정용 저항 R_M=10 kΩ을 연결하였다. 이 때 전극 사이의 방전에 의한 측정기의 손상을 방지하기 위하여 측정기 보호용으로 네온 램프를 측정용 저항과 병렬로 접속하여 사용하였다. 본 실험에서는 그림 1과 같이 평판전극의 중앙으로부터 구멍을 뚫어 화염 노즐을 설치하고, 노즐을 통해 평판전극의 하부에서 공급된 프로판 가스(propane gas)에 의해 일정한 화염을 발생시켰다.

프로판가스는 탄소(C)수가 3인 메탄계의 탄화수소(C_3H_8)를 주성분으로 하는 기체연료이다. 무색무취의 기체이며, 0°C 1기압에서 1 l의 질량은 2.02 g으로 공기의 약 1.56배이다. 상온에서 약 10~20기압정도에서 액화되는 성질이 있으므로 가압하여 저장이나 수송할 수 있는 잇점이 있다. 수송의 용이성뿐만 아니라 연소할 때는 액화기체를 대기압화시켜 사용되므로 액체연료와 기체연료의 장점을 겸비하고 있으며, 또한 프로판의 발열량은 약 23,550 kcal/m^{3}로서 매우 높고,[8] 공기중에서 강한 불꽃을 내면서 연소되므로 이것을 연료로 사용하였다. 그리고 프로판가스는 액화상태에서 제진, 탈산 및 탈탄산 등이 행해지므로 비교적 청결하고 양질인 연료로 평가되고 있다. 본 실험에서 프로판 화염의 크기는 육안으로 관찰하여 높이가 약 3 cm로서 일정하게 유지하였다. 이는 프로판 가스의 용기에 연결된 가스 압력벨브와 유량계를 조정함으로써 비교적 화염의 요동현상이 없는 안정된 화염을 발생할 수 있었다.

그림 2는 화염에 대한 수직축을 기준으로 하여 상방향 거리 h에 대한 화염 주위의 온도 분포를 나타낸 것이다.

온도의 측정에 있어서 100°C 미만의 낮은 온도는 서미스터 온도계를 사용하였으며, 고온부의 온도 측정은 약 1,600°C까지 측정 가능한 열전대 온도계(thermometer, class 0.5, 일본 Shimadzu. Co., 백금-백금 로지움 thermocouple)를 사용하여 측정하였다.

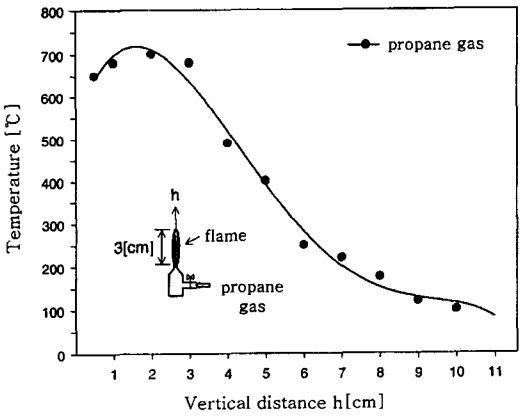


Fig. 2. Temperature distribution along the vertical distance.

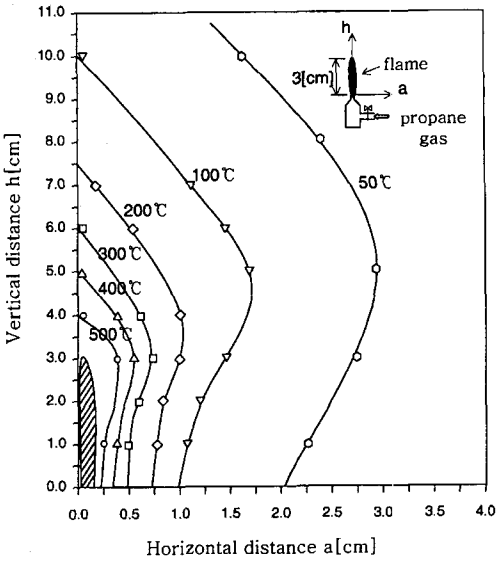


Fig. 3. Isothermal lines around the flames.

그림 2에서 나타난 바와 같이 프로판을 연료로 한 소규모 화염의 내부 온도는 약 650°C이며, 화염으로부터 수직 거리 h가 증가함에 따라 온도는 급격히 낮아지고 있다. 그러나 화염으로부터 수직거리가 증가하여 약 h=9~10 cm이상 떨어지면 실내 공기와 온도차가 적어지므로 거리에 따른 온도 분포는 완만하게 감소되고 있다.

그림 3은 화염 주위의 공기에 대한 등온선 분포를 나타낸 것이다. 화염에 대한 수평방향의 온도구배는 수직방향에 비해 매우 급격한 것을 알 수 있다. 이것은 화염주위의 공기는 화염의 측면 또는 아래에서 유입되고, 이 공기는 연료와 혼합하여 화학적 연소과정으로 화염이 발생되고, 연소 후의 고온공기는 상승기류를 형성하는 것으로 생각된다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 수직거리에 따른 절연내력 특성

3.1.1 침대평판인 경우

그림 4 및 그림 5는 수평거리 s=0 cm, 화염길이 3 cm으로 일정하게 하였을 때, 갭 길이에 따른 교류 및 직류 소화전압 특성을 나타낸 것이다. 갭 길이 d=6 cm까지 변화시킨 경우 섬락전압을 함께 표시하였다. 여

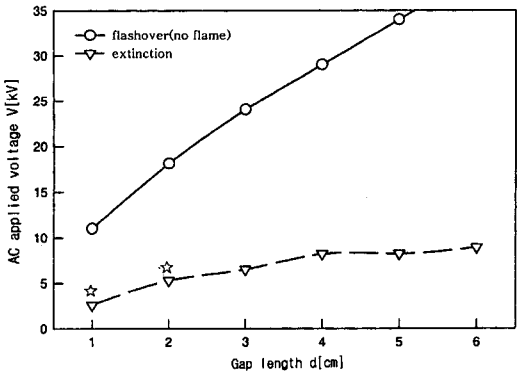


Fig. 4. Relationship between ac extinction voltages vs. gap length.

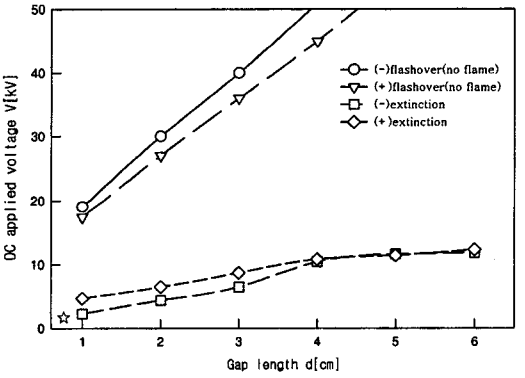


Fig. 5. Relationship between dc extinction voltages vs. gap length.

기서 교류전압인 경우 섬락전압 및 화염의 소화전압은 모두 실효치이다. 그림과 같이 침전극에서 발생된 코로나에 의해 비교적 낮은 전압에서 화염은 소화되는 것으로 나타났다. 갭 길이가 작은 경우에는 화염의 소화와 함께 플래시오버가 일어났으나, 갭 길이가 크게 되면 플래시오버가 발생되기 전에 화염은 쓰러져 소화되었다. 이것을 그림에서는 섬락이 발생된 것을 ☆표로서 나타내고 있다.

그림 4에서 d=1 cm 및 2 cm일 경우 섬락은 2.6 kV 및 5.3 kV에서 발생되었다. 화염의 길이가 3 cm이므로 갭이 이 범위 이내인 경우는 전극이 화염내에 존재하고 있다. 이 때의 섬락전압은 화염이 없는 경우를 100%으로 하였을 때, d=1 cm 및 2 cm에서는 23.6% 및 29.2%인 것으로 나타났다. 그리고 갭 길이가 더욱 증가하면, 화염은 소화되어 섬락전압의 측정은 불가능하였다.

화염의 소화전압은 갭 길이가 비교적 작은 범위에서는 갭길이에 비례하는 경향을 보이고 있으나, 갭 길이가 크게 되면 거의 일정한 것으로 나타났다. 이는 일정한 크기의 화염에 대해 소화되는 풍속은 일정하지만, 갭 길이가 증가함으로써 화염의 소화는 더욱 큰 풍속이 요구된다. 따라서 코로나풍의 세기는 인가전압에 비례하므로 결국 소화전압은 인가전압에 비례하는 것으로 생각된다.

그림 5에서 화염에 의한 섬락현상은 d=1 cm에서 직류 부극성일 때 관측되었다. 이때의 섬락전압은 2.3 kV이며, 이것을 그림에서는 ☆표로서 나타내고 있다. 상기의 부극성에 대한 섬락을 제외하고는 섬락이 일어나기 전에 화염은 소화되는 현상이 나타났다. 따라서 수직배치 침대평판 갭에서 화염에 의한 섬락 전압의 영향은 측정할 수 없었다. 그림 5는 화염의 소화 특성을 나타낸 것이며, 소화전압은 d=3 cm까지 갭 길이에 비례하여 증가되었으나, 그 이상에서는 거의 일정한 것으로 나타났다. 이는 동일한 전극배치의 교류 특성과 유사한 경향을 보이고 있다. 그림의 소화전압에서는 극성효과가 나타났으며, 부극성이 정극성보다 낮은 전압에서 소화하였다. 이는 부극성이 정극성 코로나보다 낮은 전압에서 발생되기 때문이라고 생각된다.

3.1.2 구대평판인 경우

그림 6 및 7은 수평거리 s=0 cm인 경우, 갭길이에 따른 교류 및 직류 섬락전압 특성을 나타낸 것이다. 구대평판 갭에서는 전계가 비교적 평등하므로 코로나에 의한 영향은 거의 나타나지 않았다. 따라서 침대평판 전극인 경우보다 비교적 큰 갭에서도 섬락 전압을 측정할 수 있었다.

그림 6에서 화염이 없는 경우의 섬락전압을 함께 나

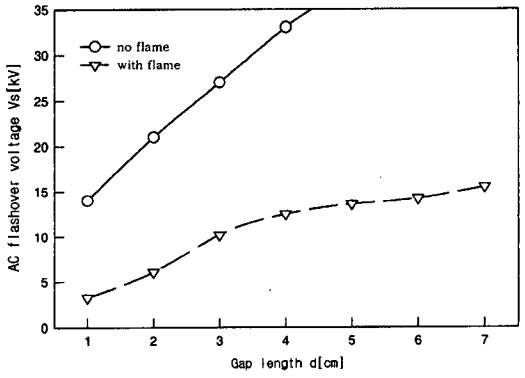


Fig. 6. Relationship between ac flashover voltages vs. gap length.

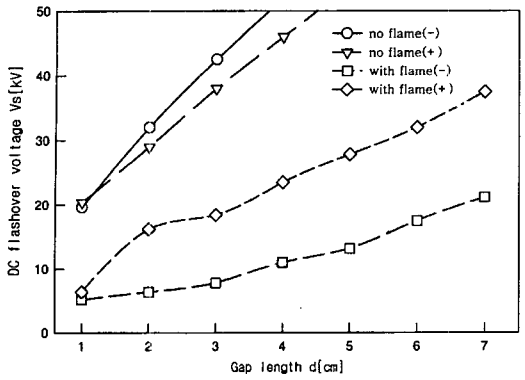


Fig. 7. Relationship between dc flashover voltages vs. gap length.

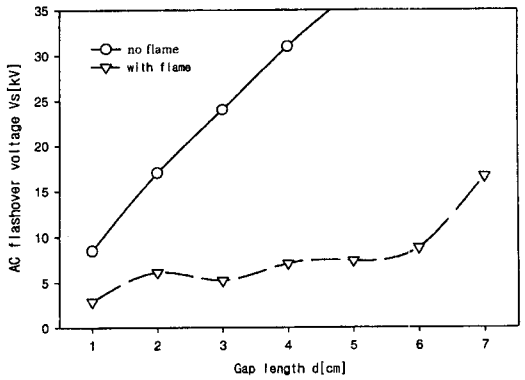


Fig. 8. Relationship between ac flashover voltages vs. gap length.

타내었다. 이때의 섬락전압을 기준으로 하였을 때, d=1 cm 및 2 cm에서 화염에 의한 섬락 전압의 상대값은 23.5% 및 30.4%이며, 갭이 증가하여 d=4 cm인 경우, 섬락 전압은 37.8%인 것으로 나타났다. 따라서 비교적 단갭의 구대평판 갭에 대한 섬락전압은 화염이 없는 경우에 비해 약 1/3의 절연내력을 갖는 것으로 나타났다.

그림 7에서는 화염이 없는 경우와 화염이 존재하는 경우에 모두 전압에 대한 극성효과가 나타났다. 그러나 화염이 없는 경우는 부극성이 정극성 전압보다 높았으나, 화염이 있을 때는 반대로 정극성이 부극성 전압보다 높은 것으로 나타났다. 또한 전압의 극성에 따른 섬락전압에도 큰 차이를 보이고 있다. d=2, 3 및 4 cm일 때 정극성에 대한 상대 섬락전압은 55.8, 52.6 및 52.1%로 나타났으나, 부극성일 경우는 19.1, 14.8 및 21.1%인 것으로 나타났다. 이는 전압극성에 따른 화염의 형상이 변화하여 섬락전압에 영향을 미치기 때문이라고 생각된다.

3.1.3 봉대평판인 경우

그림 8 및 9는 수평거리 s=0 cm인 경우 갭 길이에 따른 교류 및 직류 섬락전압 특성을 나타낸 것이다. 봉대평판 갭에서는 전계의 분포가 비록 불평등하지만, 코로나에 의한 영향은 크지 않으므로 화염의 소화현상은 나타나지 않았다.

그림 8에서 화염이 없는 경우의 섬락전압을 100%으로 하였을 때, 화염에 의한 섬락전압을 상대값으로서 나타내면, d=1 cm 및 2 cm에서는 34.1% 및 35.8%이며, d=3 cm 및 4 cm인 경우에는 21.6% 및 22.9%로 나타났다. 이와 같이 갭이 증가함으로서 섬락전압이 더욱 저하하는 것은 코로나의 발생과 화염의 상호작용에

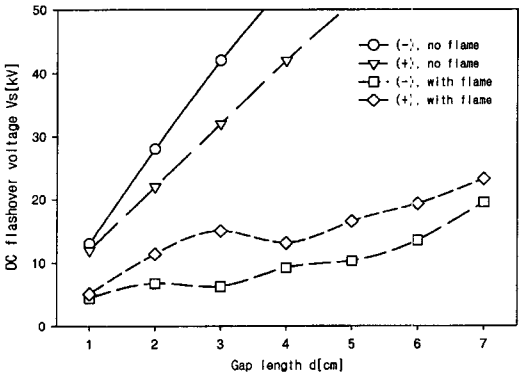


Fig. 9. Relationship between dc flashover voltages vs. gap length.

기인하는 것으로 생각된다. 갭이 더욱 증가하면 상대 섬락전압은 저하되고 있지만, d=7 cm과 같이 어느 갭 이상에서 상대 섬락전압은 다시 증가되는 것으로 나타났다.

그림 9에서 화염의 존재 유무에 따른 극성효과는 수직배치 구대평판 갭과 동일한 형태를 보이고 있다. 전압의 극성에 따른 섬락전압에는 큰 차이를 보이고 있다. d=2, 3 및 4 cm일 때 정극성에 대한 상대 섬락전압은 51.8, 46.8 및 31.1%로 나타났으나, 부극성일 경우는 24.2, 15.0 및 17.0%인 것으로 나타났다. 이것은 전압극성에 따라 화염의 형상이 변화함으로써 섬락전압에 영향을 미치기 때문이라고 생각된다.

3.2 수평거리에 따른 절연내력 특성

3.2.1 침대평판인 경우

그림 10 및 11은 화염길이 3 cm으로 일정하게 하였

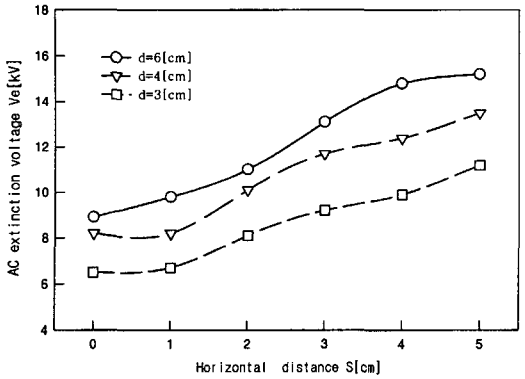


Fig. 10. Relationship between ac extinction voltages vs. horizontal distance.

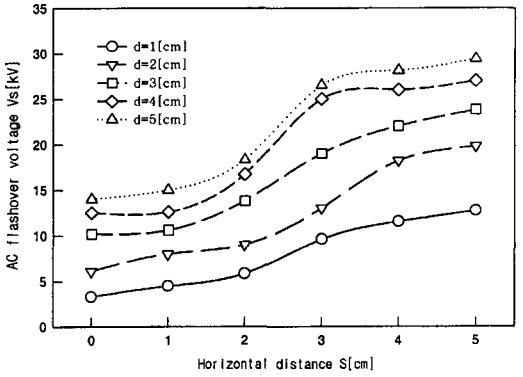


Fig. 12. Relationship between ac flashover voltages vs. horizontal distance.

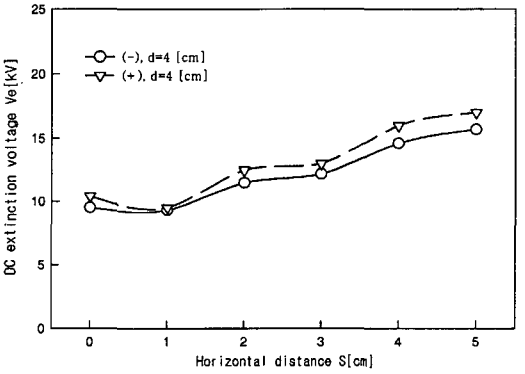


Fig. 11. Relationship between dc extinction voltages vs. horizontal distance.

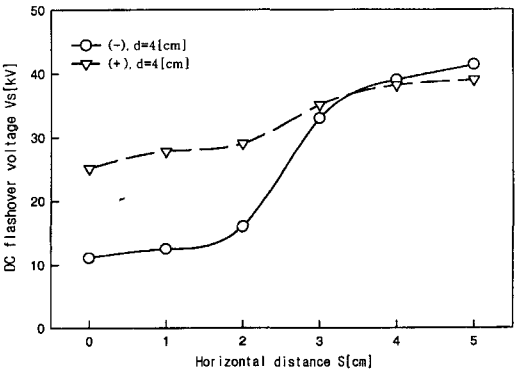


Fig. 13. Relationship between dc flashover voltages vs. horizontal distance.

을 때, 수평거리 s에 따른 교류 및 직류 소화전압 특성을 나타낸 것이다. 수평거리 s=5 cm까지 변화시킨 경우이며, 화염의 소화전압은 실효치로서 나타내었다.

화염의 소화전압은 그림 10과 같이 갭길이와 수평거리에 비례하는 것으로 나타났다. 갭길이 d=3, 4 및 6 cm일 때, 수평거리 s에 대한 소화전압의 평균증가율은 0.9, 1.1 및 1.3 kV/cm인 것으로 나타났다. 이는 일정한 화염에서 소화되는 풍속은 일정하지만, 화염과의 거리가 증가함으로 인해 화염의 소화는 더욱 큰 풍속이 요구될 것이다. 그리고 코로나풍의 세기는 인가전압의 크기에 비례하므로 결국 소화전압은 인가전압에 비례하는 것으로 생각된다.

수평거리와 갭길이의 변화에 따른 직류전압 인가시 화염은 섬락이 일어나기 전에 쓰러져 소화되었다. 화염의 소화전압은 그림 11과 같이 갭길이와 수평거리에 비례하는 것으로 나타났다. 그리고 소화전압에서는 극성의 영향이 나타났으며, 대개 정극성이 부극성보다 소화전압이 높게 나타났다. 갭길이 d=3, 4 및 6 cm일 때, 수평거리 s에 대한 직류 정극성 소화전압의 평균증가율은 1.3, 1.3 및 1.2 kV/cm인 것으로 나타났으며, 부극성인 경우에는 1.9, 1.3 및 1.2 kV/cm인 것으로 나타났다.

3.2.2 구대평판인 경우

그림 12 및 13은 화염길이를 3 cm으로 일정하게 하였을 때, 수평거리 s에 따른 교류 및 직류 섬락특성을 나타낸 것이다. 수평거리 s=5 cm까지 변화시킨 경우이며 섬락전압은 실효치이다. 화염에 의한 섬락전압은 그림 12와 같이 갭길이와 수평거리에 비례하는 것으로 나타났다. 대표적인 갭길이에 대해 수평거리의 증가에 따른 섬락전압의 증가율을 나타내면, 갭길이 d=1, 3 및 5 cm일 때 수평거리 s에 대한 섬락전압의 평균증가율은 1.9, 2.7 및 3.2 kV/cm인 것으로 나타났다. 이는

수평거리 s가 증가함에 따라 대기의 온도는 저하되고, 공기밀도는 증가하기 때문이라고 생각된다.

그림 13에서 직류 섬락 전압은 s가 작은 범위에서 극성효과는 크게 나타나고 있으나 s가 증가하면 극성효과의 영향은 그다지 크지 않는 것으로 나타났다. 섬락전압에 대한 극성효과는 정극성에 비해 부극성전압에서 크게 저하된 것으로 나타났다. 이는 부극성 코로나의 개시전압이 정극성보다 낮고, 화염은 부극성 전압에 의해 인력이 작용하기 때문이라고 생각된다. 그리고 정극성의 섬락전압은 수평거리에 거의 비례하여 증가하고 있으나, 부극성의 섬락전압은 s=2 cm까지 매우 낮지만, 이 범위를 넘게 되면 섬락전압은 크게 증가한다.

수직배치 구대평판 갭에서 d=2, 3 및 4 cm일 때, 수평거리 s에 대한 직류 정극성 섬락전압의 평균증가율은 2.7, 2.5 및 2.8 kV/cm인 것으로 나타났으며, 부극성인 경우에는 4.7, 5.4 및 6.1 kV/cm인 것으로 나타났다. 따라서 부극성의 증가율은 정극성에 비해 약 2배이며, 이는 화염에 의한 섬락전압이 부극성에서 매우 낮은 것을 의미하고 있다.

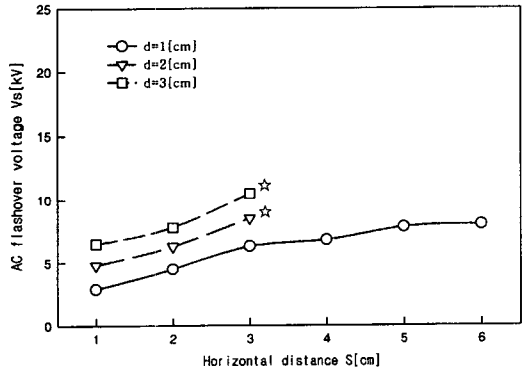


Fig. 14. Relationship between ac flashover voltages vs. horizontal distance.

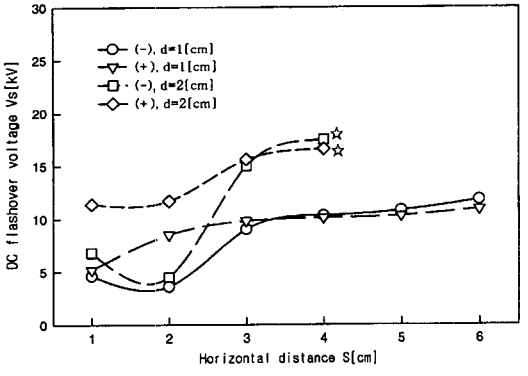


Fig. 15. Relationship between dc flashover voltage vs. horizontal distance.

3.2.3 봉대평판인 경우

그림 14 및 15는 화염길이를 3 cm으로 일정하게 하였을 때, 수평거리 s에 따른 교류 및 직류 섬락전압 특성을 나타낸 것이다. 섬락전압은 실효치이다. 그림 14와 같이 코로나풍에 의한 화염의 소화현상이 나타났으며, 갭 길이 d=2 cm 및 3 cm일 때 수평거리 s가 증가하면 화염이 소화되었으며 이를 ☆표로서 표시하였다. 그러나 갭길이가 작은 d=1 cm에서는 섬락전압을 측정할 수 있었다. 이때 수평거리 s의 증가에 따른 섬락전압의 평균증가율은 약 1.0 kV/cm인 것으로 나타났다. 이는 수평거리 s가 증가함에 따라 대기의 온도는 저하되고 공기밀도는 증가하기 때문이라고 생각된다.

그림 15에서 극성에 따른 직류 플래시오버 전압은 d=1 cm 및 2 cm에 대해 측정하였으며 비교적 s가 작은 범위에서 극성효과는 크게 나타나고 있으나 s가 증가하면 극성효과의 영향은 그다지 크지 않는 것으로 나타났다. 섬락전압에 대한 극성효과는 정극성에 비해 부극성전압에서 심하게 저하된 것으로 나타났다. 이는 부극성 코로나의 개시전압이 정극성보다 낮고 화염은 부극성 전압에 의해 인력이 작용하기 때문이라고 생각된다. 그리고 정극성의 섬락전압은 수평거리에 거의 비례하여 증가하고 있으나 부극성의 섬락전압은 s=2 cm에서 최소값을 가지며 이 범위를 넘게 되면 섬락전압은 크게 증가한다. 수직배치 봉대평판 갭에서 d=1 cm 및 2 cm일 때 수평거리 s에 대한 직류 정극성 섬락전압의 평균증가율은 1.1 kV/cm 및 1.0 kV/cm인 것으로 나타났으며, 부극성인 경우에는 1.6 kV/cm 및 2.5 kV/cm인 것으로 나타났다. 따라서 부극성의 증가율은 정극성에 비해 평균적으로 약 2배 정도이며 이는 화염에 의한 섬락전압이 부극성에서 매우 낮은 것을 의미하고 있다.

3.3 화염의 형상 및 섬락시의 파형

3.3.1 화염의 형상

수직배치 갭에서 교류 및 직류전압을 인가하였을 때, 화염의 배치상태와 전압크기에 따른 화염의 형상 변화가 나타났다. 침전극이 정극성인 경우 전압에 의해 화염은 반발력이 작용하여 침전극으로 부터 떨어지는 형상을 하고 있다. 한편 부극성 직류전압을 인가한 경우에는 전압 4 kV일 때, 화염의 형상은 전압이 낮으므로 화염은 전극방향으로 약간 기울어져 있으며, 화

염의 높이도 작아진 것을 알 수 있다. 그러나 전압 8 kV일 때, 화염의 형상은 반대로 기울어져 있으며, 화염의 높이도 작게 된 것을 알 수 있다. 이는 화염내부의 정이온과 침전극의 부극성 전압에 의해 흡인력이 작용하므로 화염의 형상은 침전극을 향하고 있다. 그러나 전압이 상승하면 침전극으로부터 발생된 코로나풍에 의해 화염형상이 침전극으로부터 떨어지는 것이라고 생각된다.

그러므로 인가 전압을 상승함에 따라 화염의 형상이 기울기도 하고, 쓰러지기도 하는 원인으로서 쿨롱힘과 코로나풍을 생각할 수 있다. 고온의 화염은 어느정도 전리상태에 있으므로 정·부의 이온이 존재하며, 전압에 의해 이동도가 큰 전자는 전계에 의해 전극으로 이동하고, 화염중에는 정이온이 다수 존재하는 것으로 생각된다. 따라서 화염은 정으로 대전되어 있고, 외부 전계에 대해 화염은 흡인 또는 반발력이 작용한다. 또한 교류전계의 경우에도 동일한 효과가 있을 것이라고 생각된다.

3.3.2 섬락시의 파형

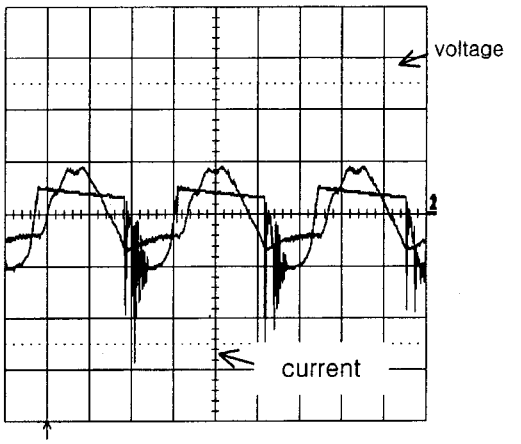
그림 16은 화염의 상태에 따른 코로나의 발생 및 섬락시의 극성을 나타낸 것이다. 화염이 없는 상태에서 d=1 cm일 때 코로나의 발생을 나타낸 것이며, 코로나는 교류 정극성에서 먼저 발생하는 것으로 나타났다. 그림 16(a)는 침전극이 화염내부에 존재하는 상태로서 d=2 cm일 때 플래시오버의 극성을 보인 것이며, 부극성에서 플래시오버가 일어남을 알 수 있다. 그리고 그림 16(b)는 침전극이 화염의 표면으로부터 떨어진 경우의 전압 및 전류파형으로서, 코로나의 개시 및 플래시오버는 교류 정극성에서 발생됨을 알 수 있다.

4. 결 론

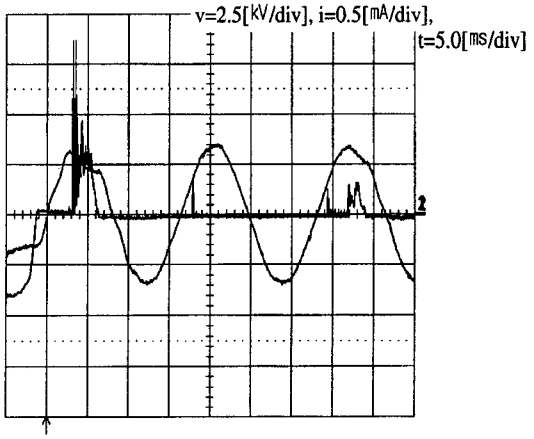
본 연구에서는 공기의 절연내력에 미치는 화염의 영향을 조사하기 위해 수직배치 전극에 대해 직류 및 교류 전압을 인가하였을 때 섬락전압을 측정하였다. 화염에 의한 섬락 특성이 갭사이의 전계분포에 의해 어떠한 영향이 있는지를 알아보기 위해 여러 가지 전극배치, 즉 침대평판, 구대평판 및 봉대평판 갭을 사용하였다. 실험에 사용된 연소화염은 프로판 가스를 사용하였으며, 화염 상부의 온도분포와 주변 공기의 등온선 분포를 측정하였다. 그리고 화염에 의한 섬락 특성은 전압의 종류, 갭길이 및 전극의 배치상태 등을 변화시킨 경우에 대해조사하였으며, 이 때 화염이 없는 경우의 특성도 조사하여 화염에 의한 영향을 상호 비교하였다.

1) 침대평판 갭의 경우, 교류전압 인가시 화염에 의한 섬락전압은 화염이 없는 경우에 비해 d=1 cm 및 2 cm일 때 23.6% 및 29.2%인 것으로 나타났으며, 갭길이가 증가함에 따라 화염은 소화되는 현상이 나타났다. 직류전압 인가시 거의 전 갭에서 섬락이 발생되기 전에 화염은 소화되는 현상이 나타났다.

2) 구대평판 갭의 경우, 화염의 소화는 일어나지 않았으며, d=1 cm 및 2 cm일 때 섬락 전압의 상대값은 23.5% 및 30.4%이며, d=4 cm인 경우는 37.8%인 것으로 나타났으며, 비교적 단갭에 대한 섬락전압은 화염이 없는 경우에 비해 평균 33.0%인 것으로 나타났



(a) 화염내부 전극배치한 경우(Vp=2.0[kV])



(b) 화염외부 전극배치한 경우(Vp=3.5[kV])

Fig. 16. Voltage and current waveforms in the needle-plane gap.

다. 직류전압 인가시 화염이 없는 경우, 부극성의 섬락전압이 정극성보다 높았으나, 화염이 존재할 경우는 반대로 정극성이 부극성 전압보다 높은 것으로 나타났다.

3) 침대평판 갭에서 교류전압 인가시 화염의 소화전압은 갭길이와 수평거리에 비례하는 것으로 나타났으며, d=3, 4 및 6 cm일 때 수평거리 s에 대한 소화전압의 평균 증가율은 0.9, 1.1 및 1.3 kV/cm인 것으로 나타났다. 직류전압 인가시 소화전압은 극성의 영향이 나타났으며, 정극성이 부극성보다 높았다.

4) 구대평판 갭에서 교류전압 인가시 갭길이 d=1, 3 및 5 cm일 때, 수평거리 s에 대한 섬락전압의 평균 증가율은 1.9, 2.7 및 3.2 kV/cm인 것으로 나타났다. 직류전압 인가시 d=2, 3 및 4 cm일 때 수평거리 s에 대한 정극성 섬락전압의 평균 증가율은 2.7, 2.5 및 2.8 kV/cm이며, 부극성인 경우에는 4.7, 5.4 및 6.1 kV/cm인 것으로 나타났다. 이는 수평거리 s가 증가함에 따라 공기밀도가 상승하기 때문이라고 판단된다.

이상의 결과는 화재발생시 고온화염에 의한 전력선의 섬락현상에 대한 기초적인 모의실험을 통해 전압의 종류, 전력선과 화염의 위치, 전력선과 화염의 높이 등에 따라 섬락특성은 큰 차이가 있으므로, 섬락사고의 발생을 최소화하기 위한 전선로의 설계시에 기초자료로서 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행되었음.

참고문헌

1. Electric Power Research Institute, "Transmission Line Reference Book, 345 kV and Above/Second Edition", pp.381-419(1989).
2. H. J. West and D. W. Mcmullan, "Fire Induced Flashovers of EHV Transmission Lines", IEEE-PES Winter Meeting, New York, Paper A73047-2, February(1978).
3. M. Hara, J. Suehiro, S. Sumiyoshitani, and M. Akazaki, "Mode and Characteristics of Corona Discharge in High Temperature Air", Trans. on IEE Japan, Vol. 107-A, No. 8, pp.379-386(1987).
4. M. Nagata, I. Miyachi, and Y. Tokoi, "Breakdown Characteristics of High Temperature Air", Trans. on IEE Japan, Vol. 104, No. 6, pp.299-306(1984).
5. 이광식, 이동인, 김인식 외, "컴퓨터시스템에 의한 저온에서의 질소가스에 대한 방전특성 측정", 한국조명·전기설비학회 논문지, 제 8권, 제4호, pp.30-37(1994).
6. K. Koyama and T. Sekiguchi, "The Measurement of the Electrical Conductivity of Seeded Flame Plasmas", Trans. on IEE Japan, Vol. 87-6, No. 945, pp.1145-31151(1987).
7. H. Kiwaki and S. Komeji, "Electerical Properties of Combustion Flames", Journal of Applied Physics Japan, Vol. 41, No. 10, pp.1077-1084 (1972).
8. F. A. Williams, "Combustion", Encyclopedia of Physical Science and Technology, Vol. 3, pp.211-235, Academic Press, Orlando, Florida(1987).