

산불화재에 의한 전력선 섬락사고 기초연구(II)

김충년\* · 이상우\* · 이광식\* · 김인식\*\* · 이동일\*\*\* · 박춘식\*\*\*\*

\* 영남대학교 전자정보공학부 · \*\* 경일대학교 전기공학과 · \*\*\*한국전력연구원 · \*\*\*\*(주)한국전력

Basic Study on Flashover Characteristics of Power Lines by Forest Fire(II)

C. N. Kim\* · S. W. Lee\* · K. S. Lee\* · I. S. Kim\*\* · D. I. Lee\*\*\* · C. S. Park\*\*\*\*

\* Yeungnam Univ. · \*\*Kyungil Univ. · \*\*\*KEPRI · \*\*\*\*KEPCO

**Abstract** - Occurring forest fire or burning bushes beneath overhead transmission 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. The results of an experimental investigation into the flashover characteristics of air dielectric strength in the presence of oil flame are reported. It is demonstrated that flame can reduce by more than half, 80% in maximum, the breakdown voltage of a model line.

1. 서 론

송전선로의 정전사고중에서 자연현상에 기인한 사고는 크게 낙뢰와 산불화재로 구분된다. 낙뢰에 의한 피해는 하절기에 많이 발생하고 있으며, 동절기에는 건조한 기후로 인해 산불에 의한 사고가 빈번히 일어나고 있다. 선로의 절연내력에 영향을 미칠 수 있는 고온화염의 형태로서는 거대한 산불화재로부터 송전선로 아래에서 소각되는 쓰레기에 이르기까지 매우 다양하다. 이러한 고온의 화염이 존재하면, 화염 상부에 있는 송전선로는 절연내력이 크게 저하되어 전력선의 선간 또는 전력선과 대지간에 섬락사고를 일으킬 수 있는 조건을 형성할 수 있으므로 계통의 신뢰도 측면에서 매우 중요한 문제가 되고 있다[1]~[3].

이와같이 산불은 재해 규모가 매우 크고, 또한 그 대상도 인명을 비롯한 가축, 농작물, 삼림자원 등을 가리지 않으며, 황폐된 산림을 복구되는 데 수10년이 소요되는 등 산불은 이제 사회문제까지 확대되었다. 산불 발생은 해마다 증가하는 추세에 있으며, 오히려 최근에는 점차 대형화되고 있다. 산림청 통계에 따르면 금년도 우리나라에서는 여러차례 대형 산불이 발생하였으며, 2001년 1월부터 9월 현재까지 전국에서 발생된 산불은 약 700건이며, 피해면적도 약 1,000[ha]에 이르는 것으로 집계되고 있다. 우리나라의 산불은 입산자의 실화 등 사소한 부주의로 비롯된 것이 47[%]를 차지하고 있으며, 논·밭두렁 태우기에 의한 것이 19[%], 군 사격 훈련 및 성묘객의 실화 등을 포함한 기타 원인이 34[%]라고 발표하고 있다[4].

특히 전력선이 통과하는 지역에서 발생한 산불은 대개 조기진화가 곤란하고, 또한 산불확산에 미치는 요인들이 매우 복잡하여 그 진행상태를 예측하기 어려울 뿐만 아니라 산불의 진화에는 장시간 소요되는 특징이 있다. 사실 우리나라의 산불은 일단 발화가 되면 진화가 쉽지가 않다. 산지의 경사와 기복이 심하고, 임도(林道)도 부족해 접근이 곤란할 뿐만 아니라, 특히 봄철에는 계절풍의 영향으로 연소진행속도가 평지의 약 8배나 빠르기 때문이다. 따라서 산불로 인한 송전선로의 피해를 사전에 예방하고, 또한 효율적으로 대처하기 위해서는 산불에 의

한 송전선로의 단락 및 지락사고의 원인을 분석하는 것이 매우 중요하다고 생각된다[5].

따라서 본 연구에서는 수직배치 모의선로에 대한 플래시오버특성에 미치는 화염의 영향을 조사하였다. 모델선로에서는 수직배치로 하였다. 안정된 소규모 화염중에서 교류 및 직류전압을 인가하였을 때, 도체의 간격, 화염의 위치, 화염의 높이 및 도체의 배치상태 등을 변화시킨 경우 공기의 플래시오버전압을 조사하였다. 이 때 화염이 없는 경우의 특성과 상호 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 모의선로의 실험장치

그림 1은 수직배치 모의선로와 화염의 관계를 나타낸 것이다. 모의선로사이의 플래시오버 전압은 수평배치의 경우와 동일한 파라핀 화염을 사용하였다. 모의선로는 역시 직경 2[mm]인 강선을 사용하였으며, 겹길이 및 화염의 높이는 그림에서 표시된 바와 같다.

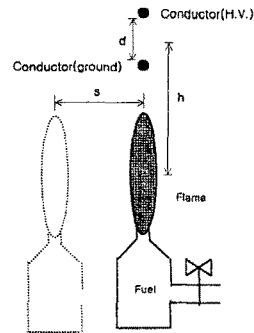


그림 1. 수직배치 모의선로의 배치도

수직배치에 대한 섬락실험에서는 화염의 접근에 의한 플래시오버전압의 영향을 알아보기 위해 도체로부터 수평거리 S를 변화시켰다. 그림 1에서는 상부도체를 고압측, 하부도체를 접지측으로 배치한 형태를 나타내고 있으며, 이 때는 화염이 접지측에 보다 접근한 상태를 나타내고 있다.

그러나 본 실험에서는 화염이 접지측보다 고압측에 접근한 상태 즉, 하부도체를 고압측, 상부도체를 접지한 경우에 대해서도 측정하였다. 이 때 상부도체에 고전압을 인가한 경우를 A형 배치, 하부도체에 고전압을 가한 경우를 B형 배치라고 하였다.

본 실험에서는 교류 및 직류 고전압을 사용하였으며, 교류 고전압은 용량 3[kVA]인 고전압 발생장치(High Voltage Generator, 일본, Matsunaga Mfg. Co. Ltd.)를 사용하였다. 이 장치는 1차 입력전압 220[V], 주파수 60[Hz], 단상이며, 2차 출력전압은 50[kV]이다. 직류 고전압은 상기 고전압 발생장치의 시험용 변압기에

서 발생된 교류 고전압을 정류하여 사용하였다. 정류장치는 실리콘정류기(일본, Tokyo Transformer Co. Ltd.)를 이용하였다[6]. 고전압의 측정은 고전압프로브(High Voltage Probe, 분압비 5000:1)와 디지털 오실로스코프(미국, LeCroy Co., type 9350AL)를 사용하였다. 본 연구에서 사용된 절연파괴전압의 측정값은 동일한 조건에서 5회 측정하여 그 평균값을 취하였다.

## 2.2 연소화염 특성

그림 2는 파라핀 화염 주위 공기의 등온선 분포이며, 이로부터 화염에 대한 수평방향의 온도구배는 수직방향에 비해 매우 급격한 것을 알 수 있다. 이것은 화염이 연소될 때 화염의 측면 또는 아래에서 유입된 화염주위의 공기는 연료와 혼합하여 화학적 연소과정이 일어나고, 연소 후의 고온공기는 상승기류를 형성하여 위로 올라가기 때문이라고 생각된다.

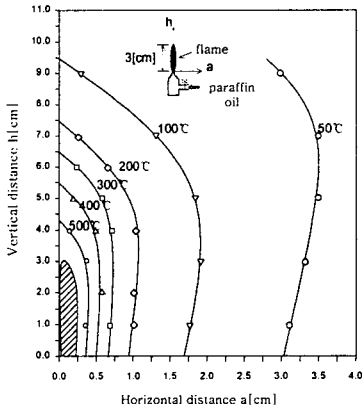


그림 2. 파라핀 화염 주위의 등온선 분포곡선

연소화염은 파라핀오일(normal paraffin oil, 순도 100%)을 연료로 사용하였다. 이 파라핀오일은 석유계 연료이며, 주성분은 탄화수소이다. 이 연료의 대략적인 조성은 탄소 75-90(%), 수소 8-25(%), 산소 0-3.3(%), 질소 0-2(%), 황 0-5(%) 등으로 되어 있다. 그리고 파라핀오일의 비점은 약 450-570(K), 밀도는 약 0.79-0.83(g/cm<sup>3</sup>), 발열량은 약 40-50(MJ/kg)이다. 파라핀오일은 액체 연료이며, 단위 중량당 발열량이 크기 때문에 연소장치를 소형으로 할 수 있으며, 연소 후에 회분(ash) 등에 의한 장치의 오손이 비교적 적게 발생하고, 저렴한 가격으로 안정되게 공급할 수 있는 장점이 있다.

램프에서 발생된 화염은 외부 바람에 의해 흔들리지 않도록 1.2×1.2×1.7(m)인 칸막이를 설치하였다. 그리고 화염의 크기는 전압이 인가되지 않는 상태에서 육안으로 관찰하여 폭 0.5[cm], 높이 3[cm] 정도로 일정하게 유지하였다. 온도의 측정에 있어서 100[°C] 이하의 낮은 온도는 서미스터 온도계를 사용하였으며, 고온부의 온도측정은 약 1,600[°C]까지 측정 가능한 열전대 온도계(thermometer, class 0.5, 일본 Shimadzu Co., 백금-백금 로지움 thermocouple)를 사용하여 측정하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 화염높이에 따른 플래시오버 특성

#### (1) 교류전압 인가시의 특성

그림 3 및 그림 4는 s=0인 수직배치 모의선로에서 화염 높이에 따른 교류 섬락전압 특성을 나타낸 것이다.

여기서 그림 3은 A형 수직배치의 섬락특성으로서, 화염의 높이는 h=3, 6, 9 및 12[cm]이다. 그림 4는 B형 수직배치의 섬락특성으로서, 화염 높이는 h=3, 6 및 9[cm]일 때 플래시오버 전압을 나타낸 것이다.

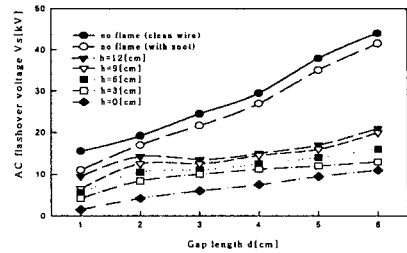


그림 3. A형 모의선로의 교류섬락전압 특성

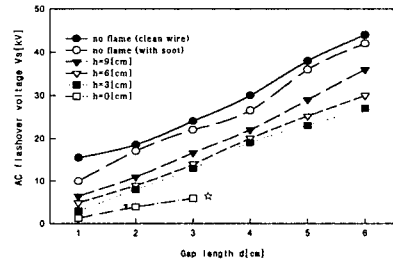


그림 4. B형 모의선로의 교류섬락전압 특성

화염이 없는 청정한 도체의 플래시오버 전압과 도체 표면에 매연이 부착된 상태의 섬락전압도 함께 나타내었다. 이는 파라핀 화염에 대해 섬락전압을 측정할 때, 연소시 발생하는 매연(soot)은 도체가 접근하면 그 표면에 부착하게 된다. 따라서 매연이 부착되기 전후에 있어서 섬락전압을 비교할 수 있다. 그림 4에서 교류플래시오버 전압은 h=0[cm]에서 d=3[cm]까지만 측정하였다. 이것을 그림에서는 ☆표로서 나타내었으며, d=3[cm]를 넘는 범위에서는 화염이 소화되었다.

그림 5는 A형 및 B형의 수직배치 선로에 대한 섬락전압을 상호 비교한 것이다. 화염이 없는 깨끗한 도체의 섬락전압을 100(%)로 하였을 때, 수직배치 A형 및 B형에 대한 상대섬락전압의 평균값은 h=3[cm]일 때 각각 35.3(%) 및 49.9(%)이며, h=9[cm]에서는 각각 49.5(%) 및 66.7(%)인 것으로 나타났다.

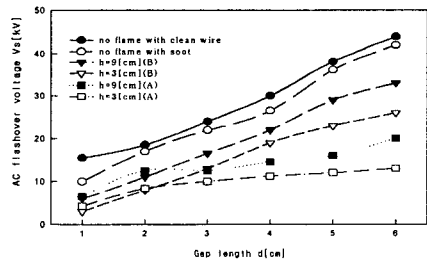


그림 5. A 및 B형 모의선로의 교류섬락특성 비교

이 결과로부터 B형이 A형보다 플래시오버 전압이 약 15(%)정도 높은 것을 알 수 있다. 이는 A형에 비해 B형배치는 고압 도체가 화염가까이 위치하므로써 전압을 상승함에 따라 코로나가 발생되고 이 코로나풍이 화염은 억제하기 때문이라고 생각된다.

**(2) 직류전압 인가시의 특성**

그림 6 및 그림 7은  $s=0$ 인 수직배치 모의선로에서 화염 높이에 따른 직류 섬락전압 특성을 나타낸 것이다. 여기서 그림 6은 A형 수직배치의 섬락특성으로서, 화염의 높이는 그림의 복잡성을 피하기 위해 대표적으로  $h=0$  및  $9$ (cm)에 대해 나타내었다.

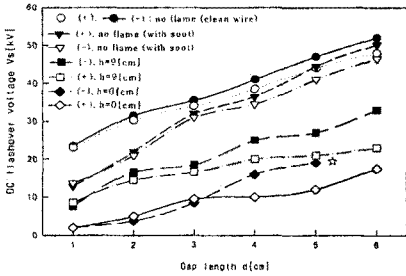


그림 6. A형 모의선로의 직류섬락전압 특성

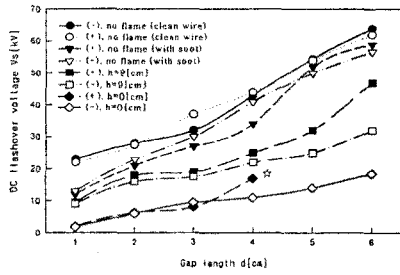


그림 7. B형 모의선로의 직류섬락전압 특성

이는 파라핀 화염에 대해 섬락전압을 측정할 때, 연소시 발생되는 매연(soot)은 도체가 접근하면 그 표면에 부착되기 때문이다. 따라서 매연이 부착되기 전후에 있어서 섬락전압을 비교할 수 있다. 그림 6에서 직류플래시오버 전압은  $h=0$ (cm)에서  $d=5$ (cm)까지만 측정하였으며, 또한 그림 7은  $h=0$ (cm),  $d=4$ (cm)까지만 표시되어 있다. 이것을 그림에서는 ☆표로서 나타내었으며,  $d=4$ (cm) 또는  $d=5$ (cm)를 넘는 범위에서 화염은 소화되는 현상이 나타났기 때문이다.

갭길이가 증가하면 극성의 영향이 비교적 뚜렷한 상태가 나타나므로 이 때 극성의 영향을 살펴보면, 그림 6과 같이 수직배치 A형에서는 부극성이 정극성보다 높고, 그림 7의 수직배치 B형에서는 정극성이 부극성보다 훨씬 높은 것을 알 수 있다. 그림 7은 B형 수직배치의 섬락특성으로서, 화염 높이는 역시  $h=0$  및  $9$ (cm)일 때 플래시오버 전압을 극성으로 구분하여 나타낸 것이다. 화염이 없는 청결한 도체의 플래시오버 전압과 도체표면에 매연이 부착된 상태의 섬락전압도 함께 나타내었다.

그림 8은  $h=9$ (cm)일 때 A형 및 B형의 수직배치 선로에

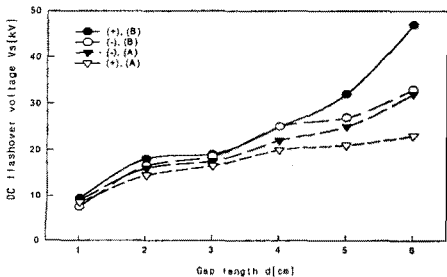


그림 8. A 및 B형 모의선로의 직류섬락특성 비교

그림과 같이 갭길이가 증가하면 극성의 영향이 뚜렷하게 나타나고 있으며, 여기서는 극성의 차이가 가장 큰 갭 즉,  $d=6$ (cm)일 때의 섬락값을 서로 비교하였다.

수직배치 A형에 대한 정극성 및 부극성의 섬락전압 값은  $23.0$ (kV) 및  $33.0$ (kV)이며, 동일한 갭에서 수직배치 B형에 대한 값은 각각  $47.0$ (kV) 및  $32.0$ (kV)인 것으로 나타났다. 이것으로부터 A형에서는 부극성이 정극성보다  $10.0$ (kV)가 높고, B형에서는 정극성이 부극성보다  $15.0$ (kV) 높게 나타났다. 이것은 고전압 도체로부터 코로나 작용과 정전력이 도체의 배치에 따라 다르므로, 이로 인해 화염의 형상이 변화하기 때문이라 생각된다.

**3.2 수평거리에 따른 플래시오버 특성**

**(1) 교류전압 인가시의 특성**

그림 9 및 그림 10은 화염높이를  $h=6$ (cm)으로 일정하게 하였을 때, 수직배치 모의선로에서 수평거리  $s$ 에 따른 교류 플래시오버전압 특성을 나타낸 것이다. 수평거리  $s=5$ (cm)까지 변화시킨 경우이며 플래시오버전압은 실패치로서 나타내었다.

그림 9는 A형 모의선로에 대한 섬락특성이며, 그림 10은 B형 모의선로의 특성을 표시한 것이며, 갭길이는 모두  $d=5$ (cm)까지 나타내었다.

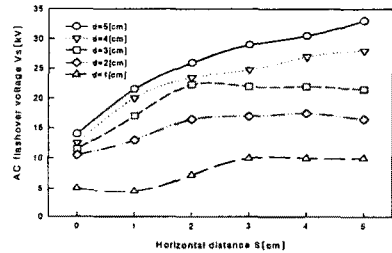


그림 9. A형 모의선로의 교류섬락전압 특성

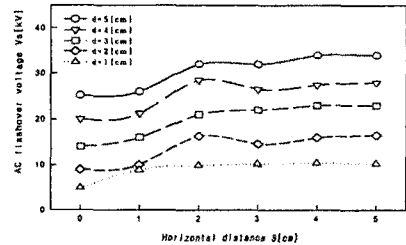


그림 10. B형 모의선로의 교류섬락전압 특성

그림과 같이  $s=2$ (cm)까지는 교류 섬락전압이 수평거리  $s$ 에 비례하여 증가되고 있다. 그러나  $s=3$ (cm) 이상에서는 수평거리  $s$ 가 증가하여도 섬락전압은 크게 변화되지 않았다.

수평거리  $s$ 가 충분히 크게 되면, 도체는 화염으로부터 멀어지므로 화염이 없을 때의 섬락전압에 접근하게 된다. 여기서 화염에 의한 섬락전압은 그림에서 보는 바와 같이 갭길이의 증가에 거의 비례하는 것으로 나타났다.

$s$ 의 영향이 비교적 크게 나타나는  $s=0$ (cm)에서부터  $s=2$ (cm)까지의 범위에서, 수평거리의 증가에 따른 섬락전압의 증가율을 나타내면, 갭길이  $d=1$ (cm),  $3$ (cm) 및  $5$ (cm)일 때 수평거리  $s$ 에 대한 A형 섬락전압의 평균증가율은 각각  $1.1$ (kV/cm),  $5.4$ (kV/cm) 및  $6.0$ (kV/cm)이며, B형 선로의 평균증가율은 각각  $2.4$ (kV/cm),  $3.5$ (kV/cm) 및  $3.4$ (kV/cm)인 것으로 나타났다. 이로부터 수평거리  $s$ 에 대한 A형 선로의 섬락전압 상승률은 B형보

다 일반적으로 높은 것을 알 수 있다.

## (2) 직류전압 인가시의 특성

그림 11 및 그림 12는 화염높이를  $h=6(\text{cm})$ 으로 일정하게 하였을 때, 수직배치 모의선로에서 수평거리  $s$ 에 따른 직류 플래시오버전압 특성을 나타낸 것이다. 수평거리  $s=5(\text{cm})$ 까지 변화시킨 경우이며 플래시오버전압은 실패치로서 나타내었다.

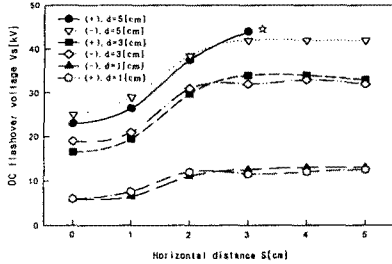


그림 11. A형 모의선로의 직류섬락전압 특성

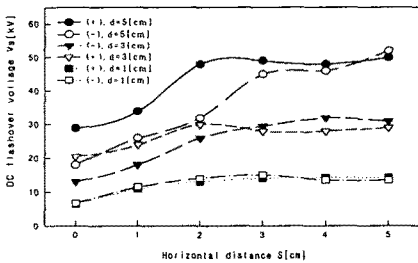


그림 12. B형 모의선로의 직류섬락전압 특성

그림 11은 A형 모의선로에 대한 섬락특성이며, 그림 12는 B형 모의선로의 특성을 표시한 것이며, 갭길이는 모두  $d=1, 3$  및  $5(\text{cm})$ 에 대해 나타내었다. 그림과 같이 일반적으로  $s=2(\text{cm})$ 까지는 직류 섬락전압이 수평거리  $s$ 에 비례하여 증가되고 있다. 그러나  $s=3(\text{cm})$ 이상에서는 수평거리  $s$ 가 증가하여도 섬락전압은 크게 변화되지 않았다. 수평거리  $s$ 가 충분히 크게 되면, 도체는 화염으로부터 멀어지므로 화염이 없을 때의 섬락전압에 접근하게 된다. 여기서 화염에 의한 섬락전압은 갭길이와 수평거리의 증가에 거의 비례하여 상승하는 것으로 나타났다.

$s$ 의 영향이 비교적 크게 나타나는  $s=0(\text{cm})$ 에서부터  $s=2(\text{cm})$ 까지의 범위에서, 수평거리의 증가에 따른 섬락전압의 증가율을 나타내면, 갭길이  $d=1(\text{cm}), 3(\text{cm})$  및  $5(\text{cm})$ 일 때 수평거리  $s$ 에 대한 A형 선로의 평균증가율은 직류 정극성에서 각각  $3.0(\text{kV}/\text{cm}), 7.0(\text{kV}/\text{cm})$  및  $7.2(\text{kV}/\text{cm})$ 이며, B형 선로의 평균증가율은 역시 직류 정극성에서 각각  $3.2(\text{kV}/\text{cm}), 4.7(\text{kV}/\text{cm})$  및  $9.5(\text{kV}/\text{cm})$ 인 것으로 나타났다.

직류 부극성에 대한 결과도 정극성과 큰 차이가 나지 않으므로 대표적으로 정극성에 대해 나타낸 것이다. 이로부터 수평거리  $s$ 에 대한 A형 선로의 직류섬락전압 상승률은  $d=3(\text{cm})$ 에서는 B형보다 높았으나, 그 외에는 일반적으로 B형이 A형보다 높은 것을 알 수 있다. 또한 그림 11에서 직류 정극성의 섬락전압은  $s=3(\text{cm}), d=5(\text{cm})$ 까지만 표시되어 있다. 이것을 그림에서는 ☆표로서 나타내었으며, 이 범위 이상에서 화염은 소화되는 현상이 나타났기 때문이다.

## 4. 결 론

모의송전선로를 상하 수직배치한 상태에서 화염의 영향에 기인한 섬락특성을 조사하였다. 화염의 배치상태와 인가전압원의 차이에 따른 섬락특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 수직배치 모의선로에서 교류전압 인가시, 수직배치 A형 및 B형에 대한 상대섬락전압의 평균값은  $h=3(\text{cm})$ 일 때 각각  $35.3(\%)$  및  $49.9(\%)$ 이며,  $h=9(\text{cm})$ 에서는 각각  $49.5(\%)$  및  $66.7(\%)$ 인 것으로 나타났다. 따라서 B형이 A형보다 플래시오버 전압은 약  $15(\%)$  정도 높은 것을 알 수 있었다.

(2) 수직배치 모의선로에서 직류전압 인가시, 갭길이가 증가하면 극성의 영향이 뚜렷하게 나타났으며,  $d=6(\text{cm})$ 일 때 A형에서는 부극성이 정극성보다  $10.0(\text{kV})$  높았으며, B형에서는 정극성이 부극성보다  $15.0(\text{kV})$  높은 것으로 나타났다.

이는 화염에 미치는 고전압 도체의 코로나 작용과 정전력이 도체의 배치상태에 따라 상이하기 때문이라고 생각된다.

(3) 수직배치 모의선로에서 교류전압 인가시, 갭길이  $d=1, 3$  및  $5(\text{cm})$ 일 때 A형 선로에 대한 수평거리  $s$ 에 따른 섬락전압의 평균증가율은 각각  $1.1, 5.4$  및  $6.0(\text{kV}/\text{cm})$ 이며, B형 선로의 평균증가율은 각각  $2.4, 3.5$  및  $3.4(\text{kV}/\text{cm})$ 인 것으로 나타났다. 따라서 수평거리  $s$ 에 대한 A형 선로의 섬락전압 상승률은 B형보다 일반적으로 높은 것을 알 수 있었다.

(4) 수직배치 모의선로에서 직류전압 인가시, 갭길이  $d=1, 3$  및  $5(\text{cm})$ 일 때, 수평거리  $s$ 에 대한 A형 선로의 평균증가율은 직류 정극성에서 각각  $3.0, 7.0$  및  $7.2(\text{kV}/\text{cm})$ 이며, B형 선로의 평균증가율은 역시 직류 정극성에서 각각  $3.2, 4.7$  및  $9.5(\text{kV}/\text{cm})$ 인 것으로 나타났다. 이로부터 수평거리  $s$ 에 대한 직류섬락전압의 상승률은 일반적으로 B형이 A형보다 높은 것을 알 수 있었다.

## [참 고 문 헌]

- [1] H. J. West, D. W. McMullan, "Fire Induced Flashovers of EHV Transmission Lines," IEEE-PES Winter Meeting, New York, Paper A73047-2, February 1978.
- [2] 김충년, 김인식, 이광식, 이동인 외, "화염에 의한 수직배치선로에서 공기의 절연과피전압 특성," 2001년도 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, pp.1735-1737, 2001.
- [3] 김영달, 김성덕, 심재명, 정동화, 강지원, "산불에 의한 가공 송전선로의 기계적 열화특성" 한국조명.전기설비학회지 제14권, 제6호, pp.26-34, 2000.
- [4] 산불관련정보, "산림청 홈페이지", <http://www.foa.go.kr>.
- [5] Electric Power Research Institute, "Transmission Line Reference Book, 345kV and Above/Second Edition," pp. 381-419, 1989.
- [6] 김인식, 김충년, 이광식, 이동인 외, "모의 송전선로의 섬락특성에 미치는 화염의 영향," 2001년도 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, pp.1738-1740, 2001.
- [7] 김광렬, 노수영, 김영주, "최신 연소공학" 도서출판 동화기술, pp. 63-76, 1999.