

camera)로 관찰된 것은 그림 1.a와 같다. 그림 1.b는 인가전압의 파형이며 그림 1.c는 여자전극의 표면근처에서 측정된 전계강도이다.

전압을 인가하기 시작해서 U_i (코로나 개시전압)에 이르면 코로나가 여자된 전극 끝에서 보이고(그림 1.a), 전계강도가 현저히 감소한다.(1.c) 이 현상이 중지한 후에, 영상변환기로 빛을 측정할 수 없으며 전계강도는 두번째 코로나가 생길때까지 점차적으로 증가하는데 이 기간을 1차 암흑기(primary dark period)로 한다. 이 현상은 반복할 수 있는데, 이 경우 다수의 1차 암흑기가 있게 된다.(그림 1.a에서는 2개의 암흑기가 있음을 볼 수 있다.) 어떤 순간에 코로나가 짊고, 지금까지의 것보다 훨씬 밝은 채널(Leader 기둥)을 수반하는데, 이로부터 1차 암흑기가 끝나고 Leader 단계가 시작된다. 이것이 일어나는 시간 T_1 , 전압 U_1 을 각각 Leader 개시시간 및 Leader 개시전압이라고 한다. Leader가 첫번째 나타난 후에, 이 현상은 다시 중지하고 2차 암흑기가 또 다른 코로나가 생길때까지 계속 되는데, 이 코로나에서는 Leader의 길이가 증가된 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 다시 반복될 수 있으며, 이 경우 다수의 2차 암흑기가 있게 된다. Leader 채널이 계속 확장되기 시작하면, 2차 암흑기는 끝나고 Leader가 연속적으로 진전한다. 이러한 현상이 일어나는 시간 T_c , 전압 U_c 는 각각 연속 Leader개시시간 및 연속 Leader개시전압이라 한다. Leader가 진전할 동안 Leader 선단은 streamer지역에 의해 앞장서는 데, 이 스트리머 지역의 길이는 Leader가 진전할 동안 약간 증가한다. 스트리머지역이 평판전극을 도달할 때(시간 T_f) Leader 선단의 속도는 지수적으로 증가하고, 10내지 20 μ s이내 Leader 선단은 평판전극에 도달하여(시간 T_b) 완전한 절연 파괴를 일으킨다.

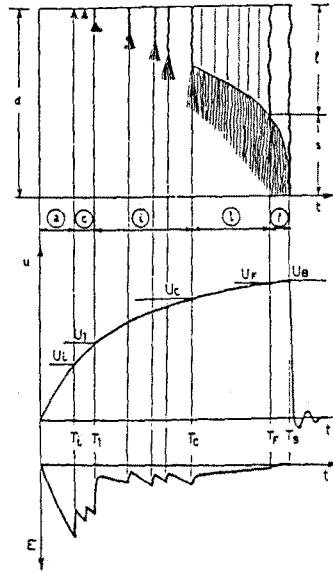


그림 1.a 이격거리 d 인 전극에서의 방전에 의한 영상 변환기 사진.
 단계 a : 아무현상도 없음
 " c : 코로나, 1차 암흑기
 " d : leader 기둥, 2차 암흑기
 " e : leader 연속진전
 " f : final jump

그림 1.b t : 시간,
 U : 전압
 T_c, U_c = 코로나 개시
 T_1, U_1 = leader 개시
 T_c, U_c = 연속 leader개시
 T_r, U_r = final jump 개시
 T_s, U_s = 절연파괴

그림 1.c 전극표면에서의 전계강도

3. 실험회로 및 방법

실험회로 및 실험 장치는 당 연구소 EHV Hall(가로x 세로 x높이:55x33x25m)내에서 설치하여 진행되었다. 실험회로는 그림2와 같다.

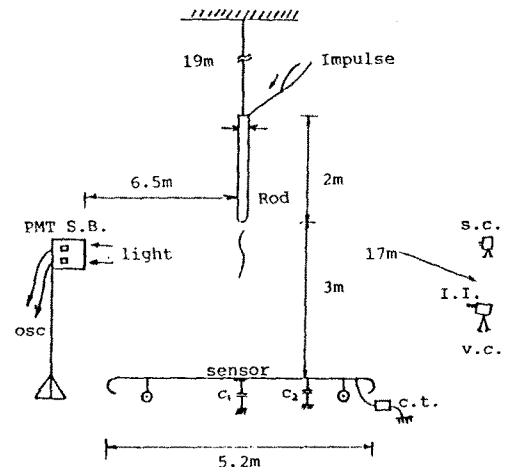


그림 2. 실험장치의 배치도.

- PMT S.B. : PMT Shield Box
- I.I. : Image Intensifier
- S.C. : Still Camera
- V.C. : Video Camera
- C.T. : Current Transformer
- C1(300pF): 전계측정 커패시터
- C2(10 μ F): 전하량측정 커패시터

정극성 기체 충격 전압을 봉-평판전극에 인가하여 절연 파괴 현상을 연구하였고, 전극간의 이격거리는 0-4m까지 조절할 수 있도록 하였으나 3m 이격거리로 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 봉전극은 길이가 2m, 끝부분의 곡률반경이 15cm인 원뿔형이고 평판전극은 가로, 세로가 각각 5.2m인 정방형이다.

Leader의 속도 측정은 봉-평판전극에 1000KV를 인가하여 완전히 섬락이 일어날 때 그 불꽃 기둥에서 나오는 빛을 2개의 PMT로서 감지할 수 있도록하여 진행하였다. PMT(P.M.'S : type HAMAMATSU R106HA)는 수직으로 5cm간격으로 설치하였고 각각 창문 앞에 2중 슬릿을 설치하여 평판으로 진행되는 Leader의 빛을 차례로 감지하여 그 시간차를 분석하여 속도를 측정하도록 하였다. 또한 실험 과정중 충격발생기 및 섬락시 전극에서 발생하는 전자장해의 영향이 PMT에 미치는 것을 방지하기 위하여 PMT를 차폐상자안에 설치하였다. 전계강도는 평판 한 가운데 sensor를 설치하여 300PF의 커패시터를 통하여, 방전전류는 평판전극 접지선에 C.T를 설치하여, 전하량도 평판으로 흐르는 전류를 10 μ F의 커패시터를 사용하여 측정하였다.

측정에 사용된 Oscilloscope는 TEK 2430A, 150MHz dual beam이고 코로나의 자세한 관찰을 위하여 Image Intensifier(Night viewing device, Litton M911) 및 Video, still camera를 전극주변에 설치하였다. 평판에 설치한 전계 sensor 구조는 그림3와 같고, 봉-평판 전극에 주입된 전하량을 측정하기 위한 sensor구조는 그림4와 같다.

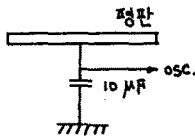
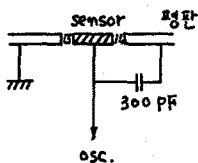


그림 3. Sensor 회로. 그림 4. 전하량 측정회로.

4. 실험결과

그림6,7 및 8은 각각 PMT 출력파형, 전계 센서 출력 및 방전 전류의 파형, 전하 sensor 출력 파형의 일례이다. 이들로부터 Leader의 전진속도, 전계, pre-discharge 전류, 전하량을 측정 하였으며 5000회 이상의 실험으로부터 표 1과 같은 결과를 얻었다.

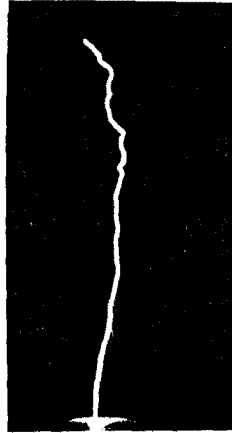


그림 5. 봉-평판전극 섬락장면.
간극 : 3m
전압 : 1000KV
파형 : 180/2500 μ s
극성 : Positive

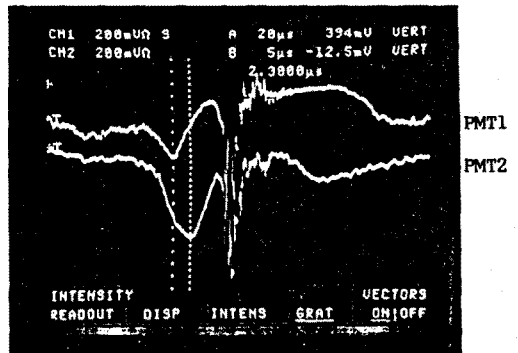


그림 6. 2개의 PMT에 감지된 빛 파형.

▶ 속도측정

$$\frac{5}{2.3} \times 10 = 2.17\text{cm}/\mu\text{s}$$

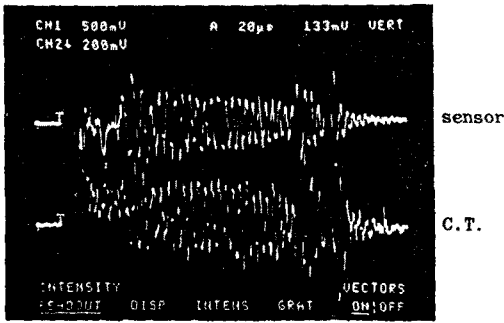


그림 7. 전계sensor와 C.T.로 측정된 파형.

$$\text{▶ 전계 } E = \frac{CV}{\epsilon_0 A} = \frac{0.9 \times 300 \times 10^{-12}}{\epsilon_0 \times (0.6 \times 10^{-2})^2 \pi} = 2.0 \text{ kV/cm}$$

$$\text{▶ 전류 } 1.2-1.6 \text{ A} \rightarrow (0.3-0.4) \times 4$$

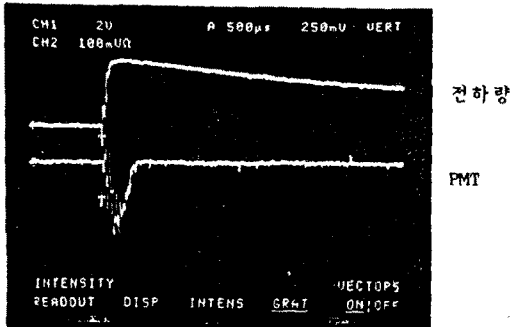


그림 8. 전압인가에 따라 유출된 전하량.

$$\text{▶ 전하량 } Q = CV = 10 \times 10^{-6} \times 1.8 = 18 \text{ (}\mu\text{C)}$$

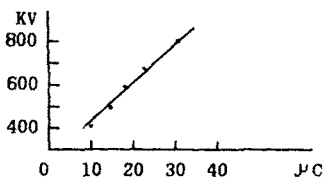


그림 9. 전압인가에 따른 전하량의 변화량.

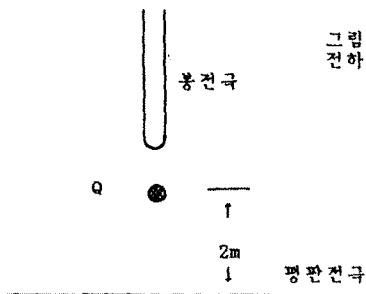


그림 10. 공간 전하의 위치.

그림 9는 인가전압이 증가함에 따라 봉-평판 전극 사이에 주입되는 전하량의 변화를 보여주고 있다.

표1. 공기점연 파괴에 영향을 미치는 요소들의 측정결과.

	측정치	인가전압	측정조건
Leader속	1-5cm/µs	1000kV	전극 : 봉-평판
전계강도	2kV/cm/kV	887kV	이격거리: 3m
방전전류	1.2-1.6A	887kV	전압파형:
전하량	11-40µC	400-887kV	180/2500µs

5. 실험결과와 분석

Leader의 속도는 측정 때마다 조금씩의 차이가 있고 대체로 속도의 범위는 1-5cm/µs로 파악할 수 있었다. Leader의 속도가 일정하지 않는 이유는 방전시 Leader의 맨 앞부분은 스트리머로 형성되는데 스트리머는 여러갈래로 진전되면서 뒤따라오는 Leader에 흡수된다. 따라서 Leader의 앞부분은 스트리머 보다는 덩그러니 여러 갈래로 형성되어 있고 방전 때마다 방전경로가 다르고 PMT에 감지되는 Leader의 빛줄기도 다를 것으로 사려되므로 Leader의 속도는 확률적인 분포로 생각되어 질 수 있다.

전계 강도는 실측치가 봉 전극에 887kV (비 십락 전압)을 인가할 때 평판에서 2kV/cm/kV였으나 계산 결과는 0.53 kV/cm/kV로 4배 정도의 차이가 있었다. 이 차이는 전계 계산이 공간 전하의 영향을 무시하고 전극의 기하학적 구조에만 의존하였기 때문에 발생하였다고 생각 된다.

공간전하는 Leader의 선단에 가장 많이 분포된다[3]. 887kV를 인가할 때 Image Intensifier로 관찰한 Leader의 길이는 대략 1m 정도이었으므로 40µC의 공간전하가 봉전극 끝에서 1m 지점에 그림 10과 같이 구형상으로 몰려있다고 가정하였다. 이 가정하에서 계산한 평판전극 표면에서의 전계의 세기는 1.8kV/cm/kV이었으므로 공간 전하를 무시한 전계계산치 0.53kV/cm/kV를 고려하면 실측치와 계산치가 대동소이함을 알 수 있다.

이상에서 봉-평판사이의 전계분포는 인가전압보다는 Leader진전에 따른 공간전하에 의해 더 영향을 받는 것을 알 수 있다.

접지선에 10 μ F의 콘덴서를 써서 봉 전극에 전압 인가시 평판을 통하여 흐르는 전하량은 11-40 μ C (400-887KV)로 측정되었다. 이는 전하량계산 식 즉

$$q = E \cdot 2\pi \epsilon r^2$$

에 전극의 조건을 대입하여($r=2m$, $E=2 \times 10^7$ v/m) 계산하면 $q = 45\mu C$ 로 계산되어 실측치와 거의 비슷하게 되었음을 확인 할 수 있다.

Predischarge 전류 i 는 아래와 같다.

$$i = c \frac{dv}{dt} + \frac{dq}{dt}$$

여기에서 c 는 봉-평판전극의 커패시턴스, v 는 인가 전압 q 는 전리작용에 의한 공간전하이다. c 는 대략 10pF, dv/dt 는 4.5×10^7 v/sec이므로 $c(dv/dt)$ 는 4.5×10^{-2} A이다. Leader의 진전 속도는 평균 3cm/ μ s이므로 Leader가 그림 10에서 Q의 위치까지 진전하는데 걸리는 시간은 약 33 μ s이다. 그러므로 dq/dt 는 약 1.2A이다. 그러므로 predischarge 전류 i 의 계산치는 약 1.2A임을 알 수 있으며, 이 값은 실측치 1.2A-1.6A와 대동소이함을 알 수 있다.

6. 결 론

공기 절연 파괴 기구를 이해하기 위해서 봉-평판 전극에 수천회의 개체 충격 전압을 인가하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) Leader의 속도가 1-5cm/ μ s임을 확인하였다. 이것은 외국의 실험결과와 유사하였다. [1-5]
- 2) 이격거리가 큰 전극에서의 전계강도의 계산은 공간 전하를 고려해야만 하고 공간 전하가 인가 전압보다는 봉-평판 전극사이의 전계강도에 더 큰 영향을 주며, 섬락 현상에서 공간전하의 영향이 매우 크다는 것을 알 수 있었다.
- 3) 과도 전계 Sensor를 개발하여 전극 표면 전계를 측정하였으며 측정결과와 계산치가 대동소이함을 알았다.
- 4) 측정된 Leader속도, 평판 전극 표면의 전계의 세기, predischarge 전류는 서로 상관관계가 있으며 그들 관계를 검토한 결과 측정치들이 의미가 있었음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Breakdown phenomena of 5m and 10m rod-plane gap, in air with positive switching impulses. CIGRE 33-15, 1972 Session, pp 1-11
- [2] Toshio Suzuki, Kunihiko Miyake
Breakdown process of long air gaps with positive switching impulses.
IEEE PAS-94 No.3, 1975, pp 1021-1033
- [3] Research on long air gap discharges at ((Les Renardieres)) by the ((Les Renardieres)) Group, paper presented in the name of study committee No.33
ELECTRA No. 23, 1972.7., pp 53-157
- [4] H. ISA, M. HAYASHI
Breakdown phenomena in non-uniform short air gap under impulse voltage.
Third international symposium on high voltage engineering, 1979, paper number 51.06
- [5] I. S. Steko'nikov and A. V. Shkilev
Development of a long positive spark in the case of an exponential voltage wave front.
Soviet physics-DOKLADY vol 8, No. 8 1964.2. pp 825-833
- [6] E. Lemke
Contribution to the evaluation of the breakdown voltage of long air gaps"
Z. Eleltr, Inf Energietechn, 1973, pp 186-192
- [7] W. M. sch, E. Lemke
A model of the breakdown process in long air spark gaps.
Electrotech, E., 1974, pp 256-260
- [8] B. Jones,
Switching surges and air insulation.
Phil. trans. Roy. Soc., 1973, A275, pp 165-180
- [9] B. Hutzler, P. Hutzler-Barre
Leader propagation Model for predetermination of switching surge flashover voltage of large air gaps.
IEEE summer meeting 1977.
- [10] G. Carrara, L. Thione
Switching surge strength of Large air gaps: physical approach",
IEEE PAS-95, 1976, pp 512-524