

# 氣體絶縁破壊機構에 대하여

/// 技術解説

吳 喆 漢\*

— 차 례 —

- 1. 氣體放電形式의 分類
- 2. 氣體放電機構
  - (1) Streamer (Primary와 Secondary)
- (2) Leader
- (3) Return Stroke와 Spark
- 3. 問題點

## 1. 放電形式의 分類

放電形式의 分類는 그것을 支配하는 放電機構에 의해서 分類하는 것이 보통이다. 1964年度 日本 電氣學會에서 發行한 放電 HAND BOOK<sup>(1)</sup>에 의하면 表 1과

같이 氣壓×間隙長( $pd$ )을 기준으로하여 短·中·長 gap로 區分하여 놓았다. 즉  $pd < 500 \text{ Torr}\cdot\text{cm}$ 에서는 短 gap로 취급하여 電子 avalanche→暗流→spark breakdown의 순으로 絶縁破壞가 일어나고  $500 \text{ Torr}\cdot\text{cm} < pd < 10,000 \text{ Torr}\cdot\text{cm}$  범위에서는

表 1. 放電形式의 分類

短 gap $pd < 500$	1 氣壓下 $d < 0.66\text{cm}$	e <sup>-</sup> Avalanche→暗流→Spark B.D. Townsend理論 ↑ Schuman criterion ↑
中 gap $500 < pd < 10,000$	1 氣壓下 $0.66 < d < 13.15\text{cm}$	e <sup>-</sup> Avalanche→Streamer→Spark B.D. Streamer說 ↑ ? ↑
長 gap $pd > 10,000$	1 氣壓下 $d > 13.15\text{cm}$	e <sup>-</sup> Avalanche→Streamer→Leader→Spark B.D. Streamer說 ↑ ? ↑ ?

$p$ : pressure (Torr)  
 $d$ : gap length (cm)

\* 1974 發行, 日本 電氣學會編, 放電 HANDBOOK에 依함.

中 gap로서 電子 avalanche→streamer→spark의 순으로, 그리고  $pd > 10,000 \text{ Torr}\cdot\text{cm}$ 은 長 gap로서 電子 avalanche→streamer→leader→spark의 순으로 絶縁破壊機構가 나타난다고 區別해 두었다.

그런데 이 分類를 1 氣壓( $p=760 \text{ Torr}$ ) 下의 값으로 換算하면  $d=0.66\text{cm}$  이하를 短間隙,  $0.66\text{cm} < d < 13.15\text{cm}$  中間隙, 그리고  $d=13.15\text{cm}$  이상이 長間隙에 해당하고, 따라서 leader는 長間隙 즉  $d=13.15\text{cm}$  이상에서만 存在하고 그 이하에서는 存在하지 않으며 streamer가 곧 spark로 유도한다고 分類하고 있다.

그러나 空氣中 1 氣壓下에서 實驗을 해보면 [사진 1]

과 같이 3cm級의 짧은 間隙에서도 leader가 存在함을 알 수 있다<sup>(2)</sup>. 이것은 極히 不均一한 電場을 만드는 間隙(point-plane 또는 rod-plane gap)에서는  $d$ 가 13.15cm 이하라도 잘 나타난다. 그러므로  $pd$ 만을 기준으로하여 分類하는 것 보다는 gap내에 형성되는 電場의 形態로서 分類하는 것이 放電機構의 出現與否의 區別이 더욱 뚜렷하게 된다. 따라서 세 分類方法으로 軸上 電場의 기울기의 最大值(maximum field gradient)에 의하여 分類하면 表 2와 같이 된다.

positive point, rod, sphere-plane (ground)의 경우에는 陽極先端(anode tip)이 電場의 기울기가 가장 큰 곳이다. 그러므로 anode field pradiant ( $E'$ )의 大小에

\* 正會員: 慶北大學校 教授·工博

表 2. 放電形式의 세 分類

Nearly Uniform Field	Anode Field Gradient $E' < 25 \text{ kV/cm}^2$	$e^-$ Avalanche → Streamer → Spark B.D. (P.S.L)
Nonuniform Field	$25 < E' < 111 \text{ kV/cm}^2$	$e^-$ Avalanche → Primary → Secondary → Spark B.D. (Leader)
Highly Nonuniform Field	$E' > 111 \text{ kV/cm}^2$	$e^-$ Avalanche → Primary → Secondary → Leader → S.B.D. ↑ Streamer說    ?    ?    ?

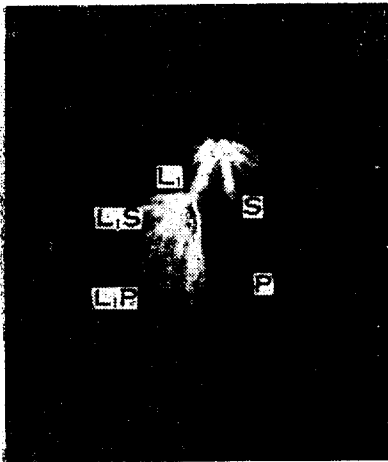


사진 1. Leader existence in 3cm gap.

따라서 區別한 것이다.

독일의 Hermstein의 研究結果<sup>(3)</sup>에 의하면 anode field gradient ( $E'$ )의 如何에 따라서 放電의 外觀形態가 다르다고 한다. 이것을 放電機構와 관련지어 分類한 것이 表 2이다. 즉 거의 均一한 電場 (nearly uniform field,  $E' < 25 \text{ kV/cm}^2$ )에서는 streamer → spark의 順으로, 不均一電場(nonuniform field,  $25 < E' < 111 \text{ kV/cm}^2$ )에서는 primary streamer → secondary streamer → spark의 順으로, 그리고 極히 不均一한 電場 (highly nonuniform field,  $E' > 111 \text{ kV/cm}^2$ )에서는 primary → secondary → leader → spark의 順으로 絶緣破壞過程이 나타난다. 다시 말하면 nearly uniform field에서는 secondary가 잘 나타나는데 이것이 cathode에 도착하면 spark를 유도하고<sup>(4)</sup> highly nonuniform field에서는 leader가 잘 나타나서 이것이 spark까지 유도한다<sup>(5)</sup>

이상은 外觀上으로 나타나는 放電機構로서 區別한 것인데 실제상으로는 어느 경우든지 primary → secondary

→ leader → spark의 모든 과정을 다 거치는 것이 아닌가 생각한다. 이들 放電機構는 서로 進展 mechanism이 다르기는 하나 電離度에 의한 導電性은 차별로 크질 것이다. 이런 觀點에서 볼 때 nearly uniform field에서도 그러한 순서로 導電性이 커졌을 것이므로 全過程이 다 포함되어 있다고 본다. 다만 uniform field에 가까운 電場일수록 絶緣破壞時間이 짧기 때문에 觀測하기가 어렵기 때문에 잘 나타나지 않은 것 처럼 보일 수도 있다.

이상과 같은 根據에서 생각하면 不均一電場下에서 絶緣破壞過程이란 長短 gap을 막론하고 根本的으로는 같은 것이라고 볼 수 있다. 다시 말하면 極히 짧은 間隙을 제외하고는 1 氣電壓下에서 絶緣破壞過程이 실제에 있어서는 電子 avalanche → primary → secondary → leader → spark의 모든 過程을 다 거친다고 본다.

따라서 이들 하나하나의 進展機構와 特性을 研究할 필요가 있다. 지금까지 알려진 特性들을 각각 살펴보기로 한다. 여기서는 주로 正極性 corona (streamer) 및 正極性 leader의 경우를 예로 드는 것을 부연해 둔다.

## 2. 氣體放電機構

### (1) Streamer (Primary와 Secondary)

正極性 corona에는 primary streamer와 secondary streamer가 存在하는데<sup>(4)(6)</sup> primary는 先端에  $10^8 \sim 10^9$  개의 (+)ion의 空間電荷를 가지고 gap내의 電場의 方向에 거의 일치하게 進展해 나간다. streamer의 進行速度는 약  $10^8 \text{ cm/sec}$ 이고 그것의 plasma 部分의 電離度는 약  $10^{12} \text{ ion/cm}^3$ 로서 아주 弱한 電離狀態를 나타내고 있다. 사진 1에서 p는 primary이고 s는 secondary를 나타낸다.

그러나 이들은 進行途中에 分枝現狀이 잘 일어나 마치 樹枝狀의 모양을 나타내므로 이것을 streamer “dendrite”라고도 부른다.<sup>(7)</sup> 이런 dendrite가 gap내에 발

생하고 난 후에는 空間에 많은 (+)空間電荷가 남게 된다. 즉 primary가 발생하고 난 후에는 그 경로가 plasma라기 보다는 걸보기에는 (+)의 空間電荷가 分布되어 있다고 본다. 그러므로 재차 primary가 발생할려면 상당한 時間(수  $\mu s$ )이 걸리는데 이것은 전술한 (+)공간전하의 移動 내지 消滅하는데 걸리는 시간이다.

다음 secondary streamer(사진 1에서 s)는 primary 경로를 따라서 anode쪽에서 進展해 나간다. 그것의 進行速度는 primary보다 한 order 늦어 약  $10^7 cm/sec$ <sup>(4)</sup>이다. 이것은 1960년도에 Hudson<sup>(4)</sup>이 光電子増倍管을 사용하여 처음 發見한 것인데 보통 電流 pulse로는 識別이 어렵고 光 pulse를 測定하면 잘 나타난다.

이것의 進展機構는 아직 確實하지 않으나 앞에서 말한 primary에 의하여 생긴 (+)의 空間電荷場에, 그 근처의 紫外線에 의하여 발생한 電子들이 새로운 電離現狀을 이르게 glow를 만든다고 본다.<sup>(6)(7)</sup> 그러므로 secondary에서 발생하는 光 pulse는 primary에 비하여 대단히 크고 지속시간도 길다. 따라서 이때 많은 ion이 발생하여 ion電流가 증가한다. 이것은 secondary의 spectrum을 보면  $O_2^+$ ,  $N_2^+$ ,  $CO_2^+$  등의 (+)分子ion들의 것이 많이 나타난다는 사실이 뒷받침한다.<sup>(9)</sup>

Hudson이 實驗한 間隙은 secondary가 cathode에 잘 도착하는 電場을 형성하는 gap이다.<sup>(4)</sup> 즉 均一한 電場에 가까울수록 secondary가 잘 도착하나 極히 不均一한 電場에서는 아무리 過電壓을 가하여도 secondary는 어느 범위까지만 進展하고 cathode까지 도착하지 못한다. 따라서 이러한 경우에는 새로운 放電機構가 存在하지 않으면 안됨을 의미한다. 即 長 gap에서 잘 觀測되는 leader가 이 경우에 잘 나타난다.

## (2) Leader

수  $m$  級의 長 gap에서는 leader가 잘 관측된다<sup>(10)(11)</sup> 이<sup>(12)</sup> 이것은 leader가 全 gap을 進行하는 時間이 길므로 (수십  $\mu s$  이상) 관측이 용이하다. 그러나 비교적 짧은 gap ( $d < 13cm$ )에서는 leader를 관측하기가 어렵다. 그러나 여러가지 測定計器, 器具가 많이 發達함에 따라 짧은 gap에서도 測定이 가능하게 되었다.

leader는 앞에서 말한 secondary 중 어느 하나가 導電性이 한단계 커져서 자기 스스로 새로운 streamer를 발생할 수 있게 되면 이것이 곧 "leader stem"이다. 이 leader stem (사진 1에서  $L_1$ )이 형성되어 이것의 끝에서 새로운 primary ( $L_1P$ )를 발생하고 이것이 다시 secondary ( $L_1S$ )를 발생하여 제 2의 leader stem을 만든다. 이러한 過程을 밟아서 leader는 進行하므로 이것의 進行速度는 느리고  $10^6 cm/sec$  정도 밖에 안

된다. 그러나 이 leader channel의 電離度는 secondary보다 높아서 약  $10^{16} ion/cm^3$ 가 된다.

이리하여 leader는 primary→secondary→leader stem의 순으로 發展하여 段階的으로 進行해 나간다.<sup>(9)</sup> 이것을 곧 "step-wise propagation"이라 한다.

leader에 대해서는 아직 의문점이 많다. 우선 secondary에서 leader stem으로 變하는 轉移機構가 아직 불확실하다. streamer에서 leader로 轉移하는데는 두 가지 說이 있는데 하나는 電子 및 ion電流에 의한 收縮說<sup>(13)</sup>이고 다른 하나는 電子電流密度的 증가에 의한 熱電離說<sup>(11)</sup>이다. 이들은 모두 secondary의 存在와 役割을 모르고 論한 것이며 아직 不明確한 點이 많다. 앞에서 말한바와 같이 secondary는 primary보다는 풍부한 電離現象을 나타내므로 leader stem 형성에 重要的 役割을 한다고 생각된다.

## (3) Return Stroke와 Spark

leader가 段階狀으로 進行하여에 cathode에 도달하면 순간적으로 電流가 수십 A로 증가한다. 이때 光 pulse를 觀測해 보면 leader의 channel을 통하여 그것과 반대방향으로 대단히 빠른 速度(약  $10^9 cm/sec$ )로 進行하는 電離光波가 있음을 안다. 이것을 "return stroke"라고 부른다. 이것은 leader가 電離度가 높으므로 高電場이 cathode에 작용하는 순간 cathode로부터 多量의 field emission이 발생하여 이 電子電流가 leader channel을 통과할 때 많은 電離를 이르게 電離光波를 만든다. 이것 역시 짧은 gap에서는 觀測하기 어렵는데 長 gap의 하나인 번개(lightning)에는 잘 觀測된다.<sup>(14)</sup> 이것이 통과한 후에 arc放電과 같은 大電流가 흘러 소위 spark가 일어난다.

spark란 leader channel이 return stroke에 의하여 電離度가 급증하여 곧 arc放電으로 移行함을 말하고 이때는 ion 및 電子電流密度가 급증하므로 壓力이 커지고 따라서 폭음을 동반한다. 이때 소리의 크기는 물론 gap의 길이와 電源에서 공급하는 에너지에 따라 다르다.

이상에서 본바와 같이 絶縁破壞過程에는 여러가지 放電機構들이 있으나 이들은 長短 gap을 막론하고 根本적으로 同質인 것이라고 생각한다. 다만 공급하는 에너지가 다르기 때문에 電離度의 차이가 있음은 사실이다. 비교적 짧은 gap의 不均一電場에서 primary의 電離度는 약  $10^{12} ion/cm^3$ 이고 secondary는 약  $10^{14} ion/cm^3$ , leader는 약  $10^{16} ion/cm^3$ , spara는  $10^{18} ion/cm^3$ 의 순으로 커진다. 따라서 streamer電流의 peak치는 수 A 정도밖에 안되나 leader는 수십 A 이상이 되고 spark 즉 arc 상태는 수백 A 가까이 된다.

### 3. 問題點

지금까지 알려진 放電機構에는 아직도 많은 의문점이 있다. 즉 streamer는 그 실효단면적이 아직 분명치 않아 電離度 계산이 不定確하다. 또 primary에서 secondary로 轉移하는 機構는 어느 정로 理解되어 있으나 secondary에서 leader stem으로 轉移하는 機構는 아직 不明確하다. 그러나 한가지 分明한 點은 不均一電場下에서 primary, secondary는 弱電離이므로 放電路를 保護하지 못하나 leader는 그것이 통과한 곳은 반드시 放電路를 保障한다는 點이다.<sup>(5)</sup> 그러므로 氣體絕緣破壞에서 가장 重要的 機構는 leader라고 할 수 있으며 이것의 本質을 밝히는 것이 대단히 重要하다. 이것의 本質을 밝히면 絕緣設計의 여러가지 問題解決에 큰 도움이 될 것으로 믿는다.

끝으로 return stroke의 mechanism도 더 밝혀야 한다.

#### 參考文獻

(1) 日電氣學會編, 放電ハンドブック, p.181 (1974)  
 (2) 吳喆漢, 慶北大教育大學院 論文集, 第9輯, p.85 (1977)  
 (3) W. Hermstein, Arch. Elektrotech., 45, 209, 279

(1960)  
 (4) G.G. Hudson and L.B. Loeb, Phys. Rev., 123, 29 (1961)  
 (5) C.H. OH and C.S. Uenosono, J. Korean Phys. Soci. 10-2, 59 (1977)  
 (6) C.H. OH and C.S. Uenosono, J. Korean Phys. Soci. 8-2, 125 (1975)  
 (7) G.G. Hudson and C.H. OH et al, J. Korean Phys. Soci., 1, 59 (1968)  
 (8) L.B. Loeb, Proc. of U.S.-Japan Seminar on Gas Breakdown and Its Fundamental Processes, p.1 81, Oct. 3-6 (Tokyo, 1972)  
 (9) 吳喆漢, 林宗明, 上之園親佐, 日本物理學會 1974年 春期分科會豫稿集 (5P-KS-3)  
 (10) J.J. Kritzing, Nature, 197, 1165 (1963)  
 (11) Aleksandrov, Soviet Phys. -Tech. Phys., 10, 948 (1966)  
 (12) I.S. Stekolnikov, Soviet Phys.-Doklady, 6, 10 85 (1962)  
 (13) G.M. Petropoulos, Brit. J. Appl. Phys., 15, 169 (1964)  
 (14) B.F. Schonland, Rmospheric Electricity(1953), Methuen (London)

---

사 람 은    자 然   保 護

自 然   是    사 람   保 護

---