超微小間隔과 極端펄스放電을 利用한 未燃燒炭素粒子 燒却除去技術 開發基礎研究 (Ⅰ) (超微小間隔의 放電現象)

文 在德　　申 修沈°
慶北大學校 大學院 電氣工學科

A Basic Study on a New Type Particulate Emission Control Means of a Power Station Using a Micro-Gap and a Pulse Discharge (Micro-Airgap Discharge Phenomena)

Jae-Duk Moon　　Soo-Youn Shin
Dept of Electrical Engg, Kyungpook Nat'l Univ

Abstract

Breakdown characteristics of a small rod-to-rod microairgap has been studied for obtain an optimum breakdown voltage and an airgap spacing to be used as an emission control means by the electrical arc-burning unburnt carbon particulates exhausted from a power station burner.

It is found that the breakdown voltage at the rod-to-rod airgap spacing in the rang of 1～100μm decreased with decrease in the rod-to-rod airgap spacing. And there were no minimum breakdown voltage on a V_b-Pd characteristics which is known as the minimum voltage in Paschen's law in air atmosphere. Breakdown voltages of the airgap at the constant airgap spacing were $V_{b\text{-}dc}>V_{b\text{-}ac}>V_{b\text{-}pulse}$, and it was lowest for the pulse voltage applied.

As a result, it is found that a pulse power was one of effective power compared with dc or ac to be used as such an unburnt carbon particulate emission control means and the airgap spacing became to several tens μm, then the breakdown voltages were down to several handreds voltages.

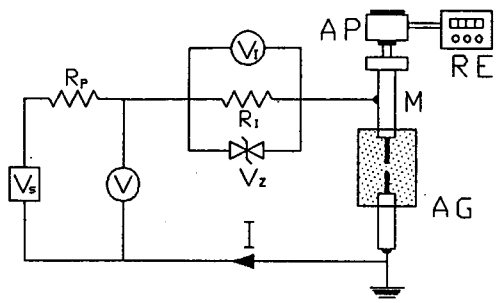
1. 序 論

공업의 발달과 인구의 증가는 電力使用量을 크게 증가시키고, 이에 代處한 發電所의 증가는 필연적으로 排塵公害를 誘發하게 되며, 이는 국민의 環境公害意識 鼓吹와 더불어 문제의 素地를 크게 한다. 또한 최근에 들어 化石燃料의 枯渴과 가격상승은 低質燃料의 사용량을 증가시키고 이로 말미암은 排出公害는 심각해지고 있는 실정이다. 排塵集塵裝置로는 大型의 경우 電氣集塵機가 集塵效率面이나 維持管理面등에서 우수하여 현재 많이 적용되고 있으나 排塵粒子의 電氣抵抗이 10^4 Ωcm 이하 이거나,(1,2) 또는 10^{12}Ω cm 이상의 경우에는 集塵效率이 크게 떨어져서 사용할 수 없게 된다. 따라서 bag filter등의 적용으로 代處하고 있으나 유지보수상의 문제점에 봉착되어 있는 실정이다.(3) 한편, 電氣抵抗이 10^4Ω cm이하의 未燃燒炭素排塵粒子의 경우 일본등에서 耐熱溫度가 높은 多孔性 alumina ceramic filetr(melting point 1400°C)로 燃燒하는 방법을 시도한바 있으나 燃燒時의 發熱로 말미암은 溶着등으로 실적용에는 이르지 못한바 있다.(4) 한편, 未燃燒炭素粒子를 絶緣破壞直前의 高電界中에 流入시킨다면 放電을 誘發시키고 이로 인하여 未燃燒炭素粒子를 消却시킬수 있게 되리라고 사료된다. 이때 사용전압은 Paschen의 법칙에서 적절한 방전전극형태와 Pd의 선택에 따라 最小放電電壓을 설정할 수 있으며, 이 값은 常氣壓인 P=760 torr일때이라도 d=100 μm이하에서 수백 V이하의 낮은 放電電壓을 용이하게 얻을 수 있게 된다.(5)

本 研究는 電氣集塵裝置로서는 再飛散現象(reentrainment phenomena)등으로 말미암아 效果的인 집진이 곤란한 10^4 Ωcm 이하의 微燃燒 炭素排塵을 電氣放電을 이용하여 消却除去하기 위한 기초연구로서 常氣壓下에서 小棒對小棒電極間의 微小間隔放電現象을 검토하였다. 未燃燒排塵粒子의 효과적인 소각제거를 위해서는 전극의 형태와 전극간격의 변화 그리고 전원의 형태가 가장 중요한 요인으로 사료되므로, 본 연구에서 小棒對小棒電極을 설정하고 超微小電極間隔變化와 電源形態變化가 방전에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 實驗方法 및 裝置

그림 1은 본 실험에 적용한 小棒對小棒電極과 실험장치 개략도를 나타낸 것으로서, 끝면이 圓形으로 처리된 白金小棒電極(Pt rod, 1.0 mm diameter, 0.50 mm radius at the rodtip)을 서로 對向設置하고, 一側에 마이크로미타(micrometer, variable spacing, S=0～25mm, Mitutoyo, Japan)을 부착하여 전극간격을 실험필요에 따라 적절히 가변할 수 있게 하였다. 또한, 이 小棒對小棒電極間의 間隔을 정밀히 조절하기 위하여 이 마이크로미타에 디지탈 微小間隔 自動調節裝置(actuator,



AG : rod-to-rod airgap
AP : actuator
RE : rotary encoder
R_I : shunt resistor
V_Z : Zener voltage
V_S : source voltage
R_P : current limit resistor
V : applied voltage
M : micro meter
I : current
V_I : voltage on shunt resistor

Fig 1. Schemetic diagram of rod-to-rod electrode and experimental setup

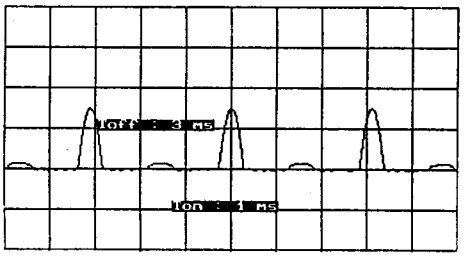


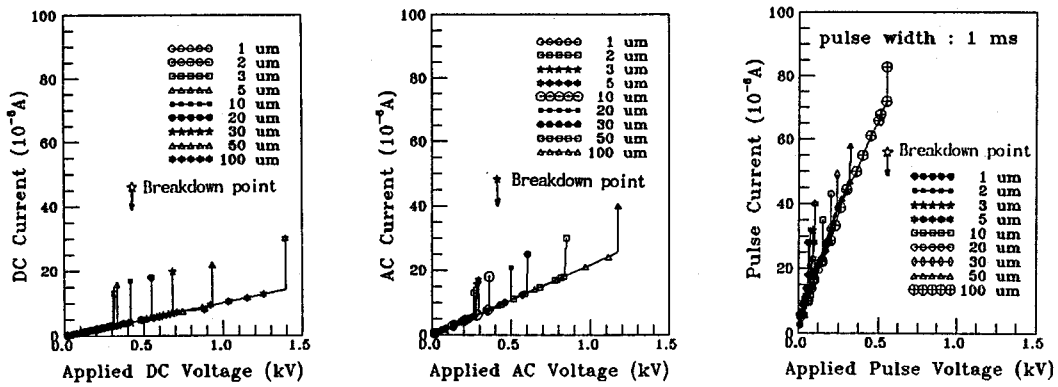
Fig 2. Pulse voltage wave form

angle-to-pulse converter and digital encorder set, 1㎛ resolution, Line Seiki Co, Japan)을 附設하여 전극간격을 1㎛까지의 정밀조정이 가능하게 하였다. 본 실험에 적용한 전원은 直流(ripple 5%이내)와 商用交流, 그리고 그림 2에서 나타낸 pulse 波形의 3종류만을 사용하였다. 이때 pulse 電源의 波形은 交流半波로서 pulse폭이 1ms이고, 휴지시간은 3ms로 고정하였다.

小棒對小棒電極間의 인가전압 측정을 위해서는 오실로스코프(oscilloscope, 100MHz, 금성사)나 디지탈 전압계 (digital voltmeter, Keithley 197, USA)와 고전압프로브 (1000:1 high voltage probe, Tetronix, USA)를 사용하였으며, 직류및 교류의 경우는 실효치, pulse의 경우는 피이크치로 표시하였다. 放電電流는 精密分路抵抗 兩端의 전압을 上記種의 오실로스코프와 디지탈 전압계로 측정하여 환산하였다. 이때 방전에 의한 디지탈전압계를 보호하기 위하여 정밀분로저항 양단에 충분한 용량의 보호소자 (Zener diode, V_Z=24, 5W)를 연결사용하였다. 또 絶緣破壞 電壓의 확인을 위해서는 방전시 발생하는 電磁波를 라디오를 이용하여 聽音하는 방법을 적용하였다. 외부로부터의 電磁的 雜音混入을 방지하기 위하여서 실험 장치는 금속통속에 封入하였으며, 또 모든 실험은 항온 항습되는 암실에서 수행하였고, 이때 분위기 온습도는 25°C 및 70%RH이다.

3. 實驗結果 및 考察

그림 3은 각각 직류, 교류 및 pulse 전압인가시의 I-V특성으로서 小棒對小棒電極間의 間隔을 變數로 한 것이다. 그림 3에서 보는바와 같이 그림 1과 같은 小棒對小棒電極間의 電極間隔이 1~100㎛정도로 可變하고, 또, 직류, 교류, 그리고 pulse전압을 인가하여도 이상의 모든 경우의 방전과정은 모두 부분방전(corona discharge)을 거치지 않고 바로 아-크방전(arc discharge)으로 이행됨을 보여준다. 이때, 절연파괴전압은 小棒對小棒電極間隔이 작아질수록 작아지며, 수 ㎛ 이내까지도 Paschen의 법칙을 나타내는 V_b-Pd 곡선상에서의 최소전압 다음에 나타나는 절연파괴전압의 상승은 없었다.[5] 한편 漏泄電流의 경우는 $I_{dc}<I_{ac}<I_{pulse}$로서, I_{dc}에 비해 I_{ac}가, I_{ac}에 비해 I_{pulse}의 경우가 현저하게 큰 값을 보여 주었다. 이는 직류전압 인가시에는 小棒對小棒電極부근의 偶存電子등만에 의해 형성되는 전류만에 의해 I_{dc}는 종속되나, I_{ac}나 I_{pulse}의 경우는 小棒對小棒電極間의 정전용량형성에 의해 유도된 變位電流分이 추가되기 때문에 큰 전류값을 가지는 것으로 사료된다. 이 變



(a) dc case (b) ac case (c) pulse case

Fig 3. I-V Characteristics of rod-to-rod airgap for dc, ac, and pulse voltage applied.

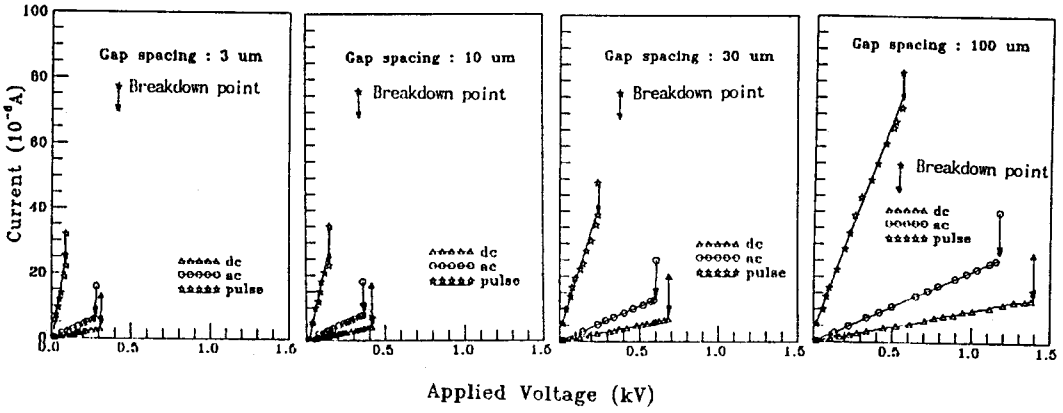


Fig 4. I-V Characteristics of 3 kinds of voltage for 4 defferent rod-to-rod airgap spacings.

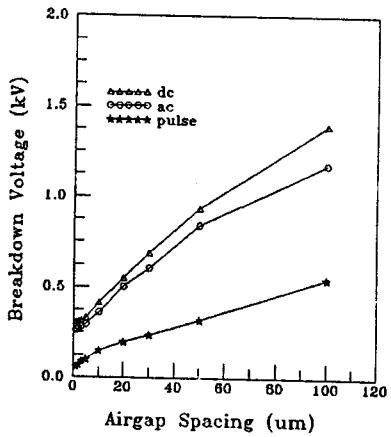


Fig 5. Breakdown voltages of 3 kinds of applied voltage as a function of rod-to-rod airgap spacing.

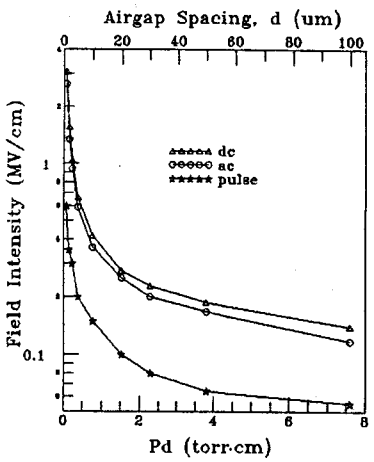


Fig 6. Field intensities of 3 kinds of applied voltage as a function of Pd.

位電流는 인가 전원의 주파수 증가에 따라 一次比例하기 때문에 ac(60Hz)에 비해 주파수가 높은 pulse(1KHz)가 더 많은 누설전류가 흐를것으로 예측된다. 그림 4는 그림 3의 I-V특성중 4종류의 小棒對小棒電極 間隔과 3종류의 인가전원을 변수하여 그린 것이다. 그림 4에서 보는것과 같이 누설전류는 인가전압의 상승에 따라 직선적으로 상승하며, 전류크기는 전술한바와 같이 $I_{pulse} > I_{ac} > I_{dc}$이다. 絶緣破壞電壓은 小棒對小棒電極의 間隔에 관계없이 $V_{b\text{-}dc} < V_{b\text{-}ac} < V_{b\text{-}pulse}$의 순을 나타내었다.

한편, 각 小棒對小棒 電極間의 間隔이 3, 10, 30, 100 μm로 증가할때 각 間隔에 있어서의 絶緣破壞 電壓이 가장 큰 直流電壓에 대한 絶緣破壞電壓比는 pulse 의 경우 31%, 32%, 35%, 및 40%로 電極間隔이 클수록 미소하지만 증가하는 경향을 보여주며, 交流의 경우는 89%, 88%, 87%, 84%로 작지만 減少하는 경향을 보여주었다.

그림 5는 小棒對小棒 電極間의 間隔變化에 따른 3 종류의 인가전원변화에 따른 絶緣破壞電壓을 나타낸 것이다. dc 의 경우는 電極 間隔이 증가할수록 絶緣破壞 電壓도 증가하며, 電極間隔을 20μm로 기준할때 이 값보다 클때는 絶緣破壞電壓은 직선적으로 증가하나, 이 값보다 작은 경우 絶緣破壞電壓은 직선적이지 못하고 급격히 감소함을 보여준다. ac 나 pulse 의 경우, 電極間隔이 증가할수록 絶緣破壞電壓도 증가되나, 완만한 飽和曲線形態를 보여준다. 電極間隔이 10μm 즉 Pd=0.76 torr·cm 정도로 작아져도 dc, ac 및 pulse 모두 絶緣破壞 電壓은 감소함을 보여주며, Paschen의 법칙을 나타내는 V_b-Pd 특성곡선상에서와 보여주는 것과 같은 絶緣破壞電壓이 상승하는 경향은 보여주지 않았다.[5] 이는 Paschen의 법칙을 나타내는 V_b-Pd 특성곡선은 주로 低壓力하에서 壓力 P 또는 전극간격 d를 變化으로 시켰으나, 본 실험의 경우 壓力은 常氣壓 (P=760 torr)으

로 고정하고 電極間隔을 변화하였기 때문에 放電 狀態가 Paschen의 실험경우의 상태와는 틀림을 보여준다. 한편, Paschen의 법칙이 $P=10^{-2}$~2400torr, d=5~200,000㎛, T=-180~860°C로 비교적 넓은 범위내에서 성립함에도 불구하고 (6) Paschen의 법칙에서 나타나는 V_b-Pd 특성곡선의 낮은 Pd의 경우와 본 실험결과가 일치하지 아니하는 부분은 실험조건 및 결과 모두 앞으로 연구검토되어야 할부분으로이라고 사료된다.

그림 6은 小棒對小棒電極間의 絶緣破壞電界E_b를 雰圍氣壓力x電極間隔의 함수로 나타낸 것이다. 이때의 電界는 小棒對小棒의 對向電極面이 球對球이므로 이때 球의 直徑 ϕ와 電極間隔 d가 $d/\phi < 1.3$의 관계가 있으면 平等電界로 간주할수 있기 때문에 小棒對小棒 電極間의 絶緣破壞電壓V_b을 이 電極間隔으로 나눔 즉, $V_b/d=E_b$ 로서 구할수 있다.(7) 그림 6에서 보는것과 같이 Pd의 감소, 즉 P=760torr로 일정할때의 d가 감소되면 絶緣破壞電界는 급격히 상승한다. Pd=1 torr·cm 이하, 즉 P=760 torr이므로 d=13.2㎛ 이하에서는 絶緣破壞電界가 급격히 증가하여 常氣壓(P=760 torr)하에서의 球對球 間隔의 d=1cm 의 경우에 비해 수십배 이상의 큰 값을 보여 주었다. 그러나, 동일 Pd일때의 각전압 형태에따른 絶緣破壞電界의 크기는 $E_{b\text{-}dc} > E_{b\text{-}ac} > E_{b\text{-}pulse}$의 순서로서 pulse 의 경우가 가장 낮았다. 한편, 전극간에 미연소탄소입자를 유입하여 전기방전으로 소각제거하는 경우 가는하면은 낮은 전압으로 이 미연소 탄소입자를 소각제거할 수 있는 pulse전원의 경우가 dc 전원이나 ac 전원에 비해 효과적일 수 있음을 보여준다.

4. 結 論

再飛散問題등으로 말미암아 전기집진장치로서는 효과적인 집진이 곤란한 未燃燒炭素排塵粒子를 전기방전현상을 이용하여 燒却除去하기 위하여 常氣壓下에서의 小棒對小棒電極間의 微小間隔放電現象을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 常氣壓下의 小棒對小棒 電極間隔이 1~100㎛ 일때, 직류, 교류 및 pulse 전압인가의 경우 이 방전간격간의 방전 과정에는 부분방전 과정을 거치지 않고 바로 아-크방전으로 이행하며, 이 실험 결과 얻은 絶緣破壞電壓과 분위기공기압력×전극간격 특성곡선상에는 Paschen의 법칙의 특성곡상에 나타나는 최소전압치가 나타나지 않았으며, 또, 전극간격이 더욱 작아져도 절연파괴전압의 상승특성도 보여주지 않았다.
2. 小棒對小棒電極間의 절연파괴 전계는 球對球間隔間의 1cm의 경우에 비해 數拾倍이상의 큰 값을 가지며, 절연파괴 전계의 크기는 $E_{b\text{-}pulse} < E_{b\text{-}ac} < E_{b\text{-}dc}$의 順이었다.
3. 한편, 未燃燒炭素粒子의 전기방전현상을 이용한 효과적인 燒却除去를 위해서는 가능한 한 저전압에서 방전이 발생하는것이 유효하므로 동일전극 간격으로 가장 낮은 전압에서 절연파괴가 발생하는 pulse전원의 경우가 ac나 dc전원에 비해 효과적일 수 있음을 알았다.

辭 謝

본 연구는 92년도 韓國電力公社의 "電力技術 基礎研究費 支援"으로 수행되었음을 알리며, 韓國電力公社와 基礎電力共同研究所에 감사를 드린다.

參考文獻

1. Senichi Masuda and Jae-duk Moon: Electrostatic Precipitation of carbon Soot from Disel Engine Exhaust, IEEE Trans on IA, IA-19, 6 (1983) 1104-1111
2. Jae-Duk Moon and Senichi Masuda: Electrostatic Precipitation for Control of Carbon Soot Particulate, Proc. of 3rd Int·l Conf. on Electrostatic Precipitation, Abano-Padova, Italy, Oct 1987, pp 1153-1158
   文在德: 디-젤排塵用 捕集裝置의 最近의 研究開發動向, 전기학회지, 32,9 (1984) pp 546-554
3. 靜電氣學會編:靜電氣ハンドブック, オ-ム社(1981)pp 507-532
4. (株)日本碍子セラミック事業部 技術室: セラミックハニカムディ-ゼル微粒子フィルタ-, 技報 82-SC-086號 (昭57年6月) PP 1-23
5. 田春生: 高電壓工學, 東明社 (1989) pp 74-77
6. 大木正路: 高電壓工學, 槇書店 (1980) pp 57-58
7. 徐國哲, 姜道烈: 新編高電壓工學, 東明社 (1985) pp 35-37