

정전기 방전에 의한 개소린-공기혼합기체의 최소착화에너지에 관한 연구

The Study about The Minimum Ignition Energy for Electrostatic
Discharge in The Gasoline-air Mixture

황 명 환*
Hwang, Myung Whan
이 덕 출**
Lee, Duck Chool

Abstract

Electrostatic charge is generated in large scale or high speed processes dealing with materials with large resistance, or under complicated condition.

Fire and explosion often occur due to electrostatic charge accumulated in flammable gases, vapor, liquids and powder.

It is usually very difficult to verify the cause of accidents as well as the prevention.

In this study, it is shown that the needle electrode needs the electrode gap from 1.8mm to 3.8mm, sphere electrode and plate electrodes need the electrode gap of 1.9mm for the minimum ignition energy.

The sphere electrode and the plate electrode requires 12.8mJ and 3.2mJ of minimum ignition energy respectively with the electrode gap of 1.1mm.

The ignition voltage rises to very large value as the ground resistance increases.

1. 서 론

일반적으로 석유류나 고분자 재료, 화학섬유 등은 전기저항이 높은 물질로 정전기가 대전하기 쉬운 성질을 갖고 있다. 그 때문에 이들의 물질을 다루는 장소 또는 사업장 등에 있어서 종종 정전기에 의해 화재나 폭발사고가 발생하고 있다.

* 국립공업기술원 전기과
** 인하대학교 전기과

석유류를 비롯한 가연성의 액체는 물체간의 마찰작용에 의해 발생한 정전기 방전과 같은 작은 에너지에 의해서도 착화하는 일이 있다. 이러한 종류의 재해 사고에선 착화성이 높은 액체나 가스, 분진 등의 물질피해 뿐만 아니라 다수의 인명피해를 부르는 일이 있다. 이 때문에 가연성액체의 충전 등에 있어서는 정전기에 의한 화재·폭발 등 사고 발생의 위험성을 배려해서 대책을 세우는 것이 필요하다¹⁾.

그러나 정전기 방전에 의한 화재·폭발은 미리 추측하기가 극히 곤란할 뿐만 아니라 재해후의 재현 실험에 의해서 원인을 검증할 수도 없는 일이 많다. 그 이유는 정전기가 재현성이 부족한 현상임과 아울러 착화원이 되는 정전기 방전이 확률현상이기 때문에 인과관계를 결정론적으로 논하는 것은 불가능하기 때문이다. 더우기 가연성물질의 폭발현상도 각종의 원인에 의존하는 래디컬반응이고 이것도 확률현상이기 때문이다²⁾.

이상과 같은 배경에서 정전기 방전에 의한 가연성물질의 착화 및 폭발현상에 대해서는 여러 각도에서 연구되고 있으며³⁾, 또 폭발재해의 방지기술에 대해서도 많은 시도가 이루어지고 있다.

본 연구에서는 방지기술의 일환으로서 고압전원을 가지고 Gasoline-공기혼합기체의 최소착화방전전압을 전극의 간격, 전극의 종류, 습도, 접지저항을 변화시켜 구했기에 서술 하고자 한다.

2. 실험 및 장치

일반 가연성 가스 또는 액체의 증기는 공기와 같은 支燃性가스와 혼합해서 그 혼합농도가 폭발범위(폭발하한계 농도 이상, 상한계농도 이하)이면, 정전기방전, 기계적 불꽃 등의 에너지가 계기가 되어 가연성 가스·증기의 연소 반응인 착화폭발이 발생한다. 바꾸어 말하면 가연성가스·증기의 착화에는, 그 혼합농도가 폭발범위에 있을 것과, 그것이 연소반응을 일으킬 만큼의 에너지를 필요로 한다. 일반적으로 전자는 폭발한계농도(explosive limit of flammable mixture), 후자는 착화에너지(ignition energy)라 불리며 이들은 가연성 가스·증기의 종류에 따라 각각 다를 뿐만 아니라, 온도, 압력 등 각종의 원인에 의존한다.

연소범위에 있는 가연성의 혼합기체에 착화하기 위해서는 외부로부터 어떤 형태로든 에너지를 공급해 줄 필요가 있다. 이때에 가해질 필요가 있는 에너지의 양을 최소착화 에너지라고 한다. 사고 등에서는 전기 불꽃, 기계적인 마찰이나 충격, 裸火 등 각종의 에너지가 착화에너지의 공급원으로 되지만, 이들의 대부분의 에너지 형태에서는

외부로부터 공급된 에너지의 어느정도의 비율이 착화에 기여했는가를 평가·측정하는 것은 곤란하다. 여기서 최소착화 에너지의 측정에는 공급 에너지의 대부분이 열 에너지로서 착화에 유효하게 소비되어, 측정의 재현성이나 정도도 높은 것으로부터 콘덴서에 축적된 전하의 방전 불꽃에 의한 방법이 쓰여지고 있다. 그림1에 최소착화 에너지의 측정법의 원리를 나타낸다. 고압 전원으로부터 공급되는 전류로, 정전용량 C(F)의 콘덴서를 충전해 가면, 그 양단의 전압은 그림1 (b)에 나타내듯이 시간과 더불어 지수함수적으로 상승하고, 폭발 용기내의 전극간에서 방전이 발생한다. 이때의 전위를 $V_i(V)$ 라 하면 그 방전 에너지는 $1/2 \cdot CV_i^2(J)$ 이 된다. 콘덴서의 정전용량 등을 바꾸므로 여러 에너지를 갖는 방전을 일으켜, 가연성 혼합기체의 착화 유무를 조사하므로 최소착화 에너지를 구한다.

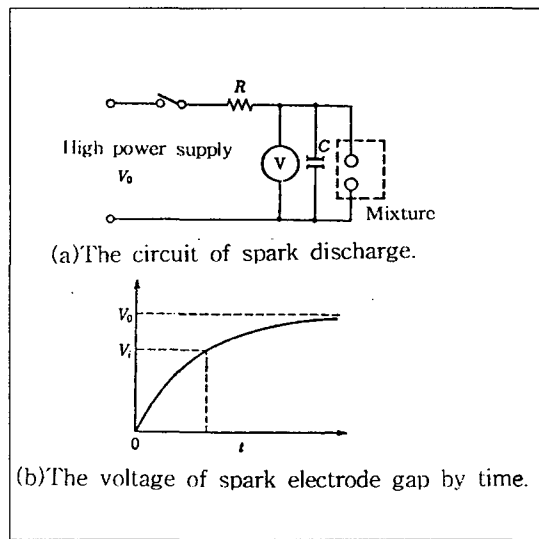


Fig. 1. The principle of ignition energy measurement apparatus⁴⁾

정전기 폭발실험장치는 우선 폭발성 혼합기체를 밀봉하여 가둘수 있는 용기가 필요하다. 이 용기내에는 방전전극을 설치하여 이를 통하여 대전된 정전기 전하를 불꽃 방전 시킬수 있게 되어 있다. 용기(그림 2)는 투명하여 외부에서 방전현상 및 폭발과정을 쉽게 관찰할 수 있도록 하였다.

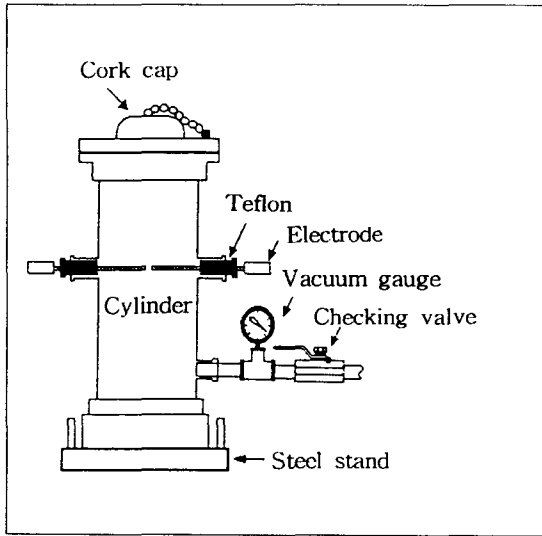


Fig. 2. The figure of electrode contained in explosion vessel

이 폭발용기의 용적은 1ℓ이며 상온에서 이 용기에 0.08~0.3ml의 개소린을 넣어 공기와 혼합시켜 에너지를 제공하면 착화 폭발한다. 착화의 판정은 9회 연속×5회 방전을 반복하여 착화한 경우는 착화로 판정하고 착화하지 않을 경우에는 새로운 혼합기체로 채운후 방전 전압을 변화시켜 위와 같은 회수로 방전을 반복하여 착화하는 경우를 착화로 판정하여 착화 에너지를 구했다. 그러나 0.08ml 근방이나 0.3ml 근방에서는 착화폭발의 확률이 낮아 0.2ml의 양을 택해 본 실험에 채용했다.

폭발통에 들어있는 혼합기체는 방전전극에서 발생하는 방전 에너지에 의하여 착화 폭발하게 되는데 이 에너지는 electro-tech systems 社 (model 930c)의 Electrostatic Discharge Simulator(0~±30kV, c=100pF)에 의해 공급하였다. 이 장치의 기능은 그림 3에 나타내는 Block Diagram⁵⁾과 같다.

3. 결과 및 고찰

그림 4는 전장에서 나타내는 실험장치와 실험 방법에 의하여 침대침 전극을 사용하여 전극간격을 일정간격으로 변화시키면서 gasoline-공기혼합가스가 착화하는 최소의 착화 방전전압을 구한 것이다.

그림을 살펴보면 전극간격 1.8~3.8mm 사이에서 최저의 착화 방전전압을 나타내며 1.8mm이하의 전극간에서는 착화가 일어나지 않다가 1.2mm에서 비로서 21.4kV라는 높은 전압을 인가해야만 착화가 일어남을 알수있다.

전극간격 3.8mm 이상에서는 전극간격에 비례해서 방전전압이 높아짐을 보이고 있다.

특히 침전극에 있어서는 비착화방전영역에 있어서 코로나 방전은 항상 존재하지만 착화하는데 필요한 에너지에 미치지 못할 뿐이다. 1.8mm이하의 전극간격에 있어서는 방전에 의해 발생한 작은 열 에너지가 가스분자에 주어지면 화학반응이 시작되어 열이 생성되는데 이때 생성된 열이 외부로

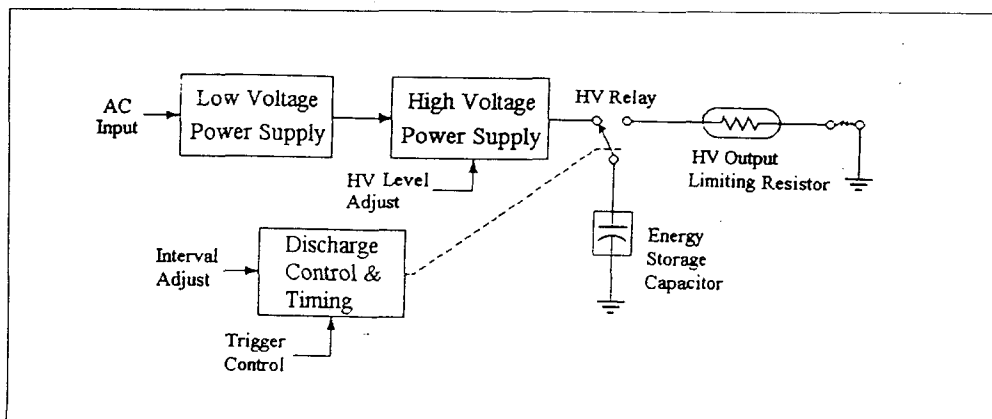


Fig. 3. The mechanism of Electrostatic Discharge Simulator

방출되는 열을 증가하지 못하여 연쇄반응을 일으키는 데는 더 큰 에너지를 요하는 것으로 여겨진다. 즉 전극을 통하여 열이 급격히 방출되기 때문으로 여겨진다.

그림 5는 침전극을 고압으로 하고 구전극을 접지측으로 한 경우와 구전극을 고압으로 하고 침전극을 접지측으로 한 경우의 전극간격 변화에 따른

gasoline-공기혼합가스의 최소착화 방전전압을 구한 것이다. 그림 4와 비슷한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 전극간격 1.0~3.5mm까지는 구대침이 침대구전극보다 더 낮은 전압에서 착화함을 알 수 있고 그 이외의 간격에서는 침대구전극이 더 낮은 전압에서 착화함을 알 수 있다. 그리고 양쪽 모두 1.9~2.5mm사이에서 최저치를 나타내고

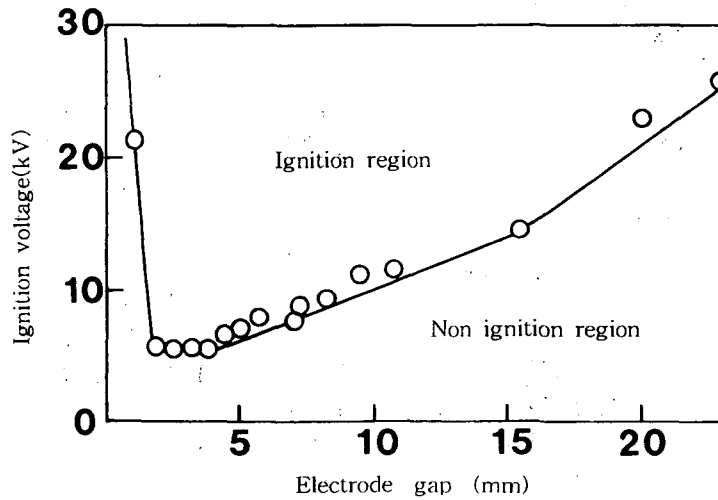


Fig. 4. The ignition voltage vs. electrode gap between two needle electrodes.

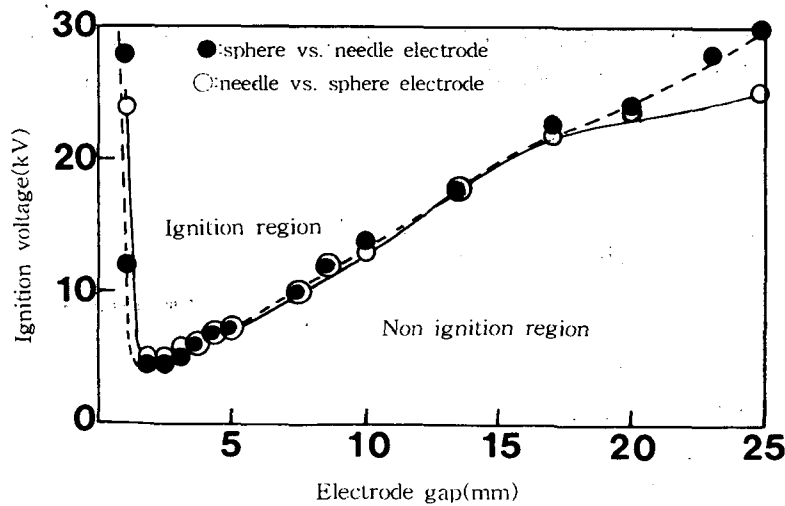


Fig. 5. The ignition voltage vs. electrode gaps between the needle and sphere electrode(earth), between the sphere and needle electrode(earth).

있음을 알 수 있다. 침대구인 경우 좁은 전극간격에서는 방전을 발생하는 쪽보다 접지쪽이 열용량이 크므로 방열 현상이 크지만 반대로 구대침인 경우 방전을 발생하는 쪽의 열용량이 접지쪽보다 크므로 더 낮은 방전전압에서 착화하는 것으로 해석할 수 있다. 또한 전극간격이 넓은 영역에 있어서는 침전극이 접지된 경우에 전극간에 방전이 발생하면 그 방전은 통상코로나 방전이 되어 착화원으로 되기 어려우므로 더 많은 에너지를 갖는 방전전압을 필요로 한다. 이처럼 착화성 방전이 발생하는지 아닌지는 접지체와 같은 다른쪽 전극의 조건에 크게 의존한다.

그림 6은 구대구전극(직경5mm)을 사용하여 전극간격을 일정간격으로 변화시키면서 착화하는데 필요한 최소방전전압을 구한 것이다. 침대침이나 침대구전극의 경우 낮은전압에서 그리고 전극간격 1.9~3.8mm 사이에서 최소치를 나타냈으나 구대구전극의 경우에는 전극간격 1.9mm에서 최소치를 나타낼 뿐 그 외에는 전극간격에 비례해서 높은 방전전압이 요구되고 있음을 알 수 있다.

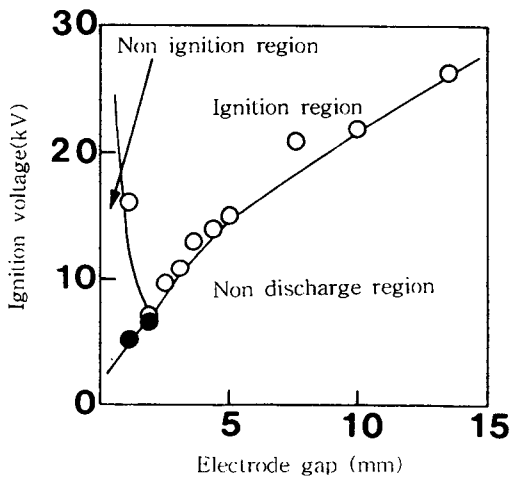


Fig. 6. The ignition voltage vs. electrode gap between the sphere and sphere electrode.

전극간격이 1.9mm에서는 7.3kV의 전압을 인가한 경우 착화폭발을 일으키지만 6.8kV에서는 방전 불꽃만 관찰될 뿐 착화폭발은 발생하지 않았다. 그외 그 이하의 간극(1.1mm)에서는 5.2kV

이상에서 방전 불꽃은 관찰되었으나 착화폭발은 발생하지 않았다(비착화성방전역). 그러나 1.1mm에서 16kV 즉 12.8mJ 이상의 에너지를 주어야만 착화폭발을 알았다. 球전극이기 때문에 전극이 갖는 열용량이 커서 전극간격이 좁은 상태에서는 착화에 필요한 에너지가 모두 금속구를 통해 방출되므로 착화폭발을 일으키지 못하는 것으로 사료된다. 그외 각종의 요인이 가미되는 것으로 확률현상이라고 볼 수 있다.

그림 7은 평판대평판전극의 착화방전영역을 구한 것이다. 그림 6의 球對球전극의 경우와 비슷한 경향을 나타내는 것으로, 전극간격 1.9mm에 있어서는 구전극과 거의 같은 수치를 나타내고 있다. 그러나 전극간격 1.1mm에 있어서는 구전극보다 훨씬 낮은 전압에서 착화폭발하였다. 이는 평판전극이기 때문에 전극사이에 더 많은 에너지를 저장할 수 있어서 용량증가 효과에 따른 에너지의 증가가 열방출 효과의 영향을 초과하기 때문으로 여겨진다.

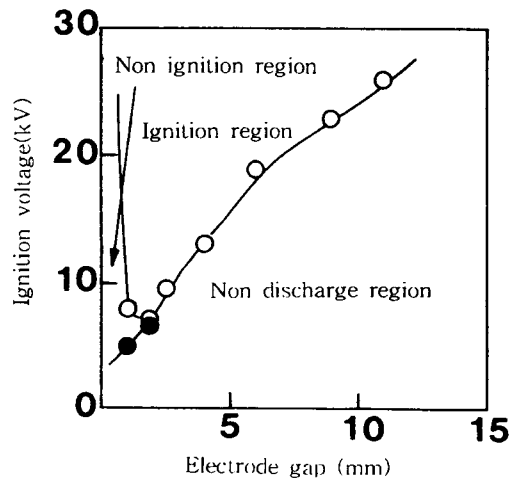


Fig. 7. The ignition voltage vs. electrode gap between the plate and plate electrode.

또한 전극간격이 넓은 범위에 있어서는 평판의 경우 공기중에서 30kV/10mm의 절연파괴 강도를 갖지만 gasoline-공기혼합기에 있어서는 대략 24.3kV/10mm 정도에서 절연파괴가 일어나 착화폭발이 발생함을 알았다.

그림 8은 침전극(전극간격2.5mm)을 사용하여 습도를 변화시키면서 그 습도 환경에서 발생하는 착화방전전압의 크기를 구한 것이다. 그림에서 살펴보면 상대습도의 증가에 따라 착화방전전압의 변화는 그다지 크지 않음을 알 수 있다.

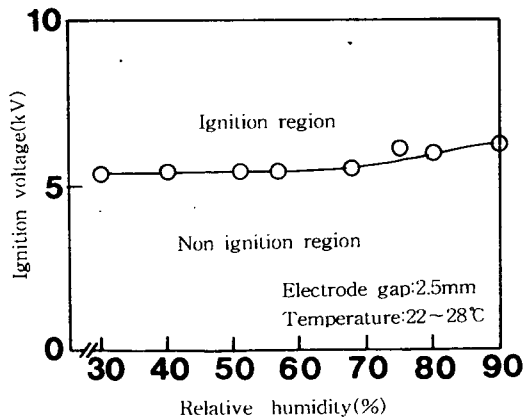


Fig. 8. The variation of ignition voltage according to the earth resistance.

프로판-공기혼합기의 경우 상대습도가 증가하면 기상중에 존재하는 물분자는 폭발한계농도의 축소 효과로서 작용함과 아울러 착화를 억제하는 방향으로 작용하므로 최소착화 에너지는 상당히 커지는⁶⁾ 것으로 보고 되어 있으나 gasoline-공기 혼합기에 있어서는 그다지 큰 변화를 가져다 주지 못하는 것으로 나타났다. gasoline-공기혼합기의 경우 방전에너지가 상대습도에 영향을 그다지 받지 않는 것으로서 혼합기의 종류에 따라서는 습도의 증감이 어느 정도의 효과는 있지만 절대적인 억제 방법이라고 볼 수는 없는 것으로 사료된다.

그러나 대전물체 등에 대전되어 있을 경우에는 상대습도의 증가에 따라 대전전위⁷⁾가 급격히 감소하므로 대전전위 감소로 인해 방전현상이 억제 될 것으로 여겨진다.

그림 9는 전극간격 2.5mm(침전극)를 갖는 전극의 접지쪽에 표면저항치가 다른 물질을 폭1cm, 길이10cm로 연결하여 착화방전전압의 크기를 구한 것이다. 그림에서 보는바와같이 표면비저항치

가 20(kΩ/□) 이상에서 부터 착화방전전압의 크기가 급격히 증가함을 알 수 있다.

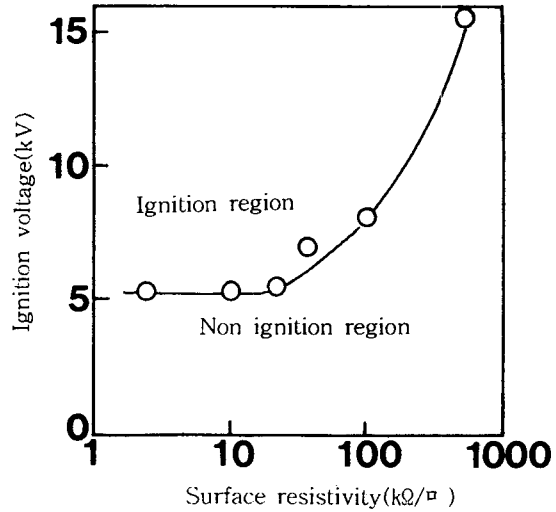


Fig. 9. The variation of ignition voltage according to the relative humidity.

착화성 방전을 방전전에 추정할 수 있으면 정전기 방전에 의한 가연성물질의 착화는 대부분의 경우 미연에 방지할 수 있다. 그러나 착화성방전의 발생은 대전물체 만에 착안해서 추정할 수 없다. 바꾸어말하면 착화성방전의 발생한계는 대전물체와 다른물체, 통상은 다른한쪽의 방전전극으로 되는 접지체 등의 상태에 의존하기 때문이다. 예를 들면 대전물체가 금속과 같은 도체이고 대전전위가 높으며, 이것에 축적되어 있는 정전에너지가 최소착화에너지 이상이라 하더라도 이것과 접지된 전극이 침과 같은 물체 사이에서 방전이 발생하면 그 방전은 통상 코로나 방전으로 되어 착화원이 되지 않는다. 그림에서 보듯이 접지체의 전극이 침전극이고 접지저항이 적당히 크면 방전전류를 억제하는 효과가 있어 착화성방전을 제어할 수 있음을 알 수 있다. Tabata⁸⁾ 등에 의하면 교류(50~1000Hz)를 이용한 제전기로부터 발생하는 착화성 방전의 제어실험에서도 전원측의 전극에 저항을 결합시켜 착화확률을 구한 결과, 저항의 증가에 따라 착화확률이 급격히 감소하고 착화방전전압도 큰 전압이 요구되고 있음을 보고 하고 있다.

4. 결 론

정전기에 의한 재해사고는 과학기술의 발전에 따라 개발된 석유제품이나 고분자재료등이 원인이 되어 부차적으로 발생하는 새로운 재해 형태의 하나이다. 그리고 근년 이런 종류의 재해 사고는 이들 제품이나 재료 등의 수요 증가에 수반하는 생산시설의 대형화, 생산공정의 고속화 등 복잡한 조건에 좌우되어 발생하기 때문에 사후의 실험·측정으로부터 착화원 등을 검증하는 것은 극히 곤란한 경우가 많고, 이런 종류의 재해는 사전에 예지하고 유효한 대책을 실시하는 것은 더욱 곤란하다. 그런 의미에서 본 연구에서 행한 실험은 정전기에 기인해서 발생하는 재해사고(화재폭발)를 방지하는 일조로서 귀중한 실험 예라 할 수 있으며 실험을 통해 다음과 같은 것을 알았다.

1) 칩대칩전극의 경우 전극간격 1.8~3.8mm 사이에서 최저의 착화에너지(1.6mJ)가 필요했고, 1.2mm에서 22.9mJ의 에너지가 필요했다.

2) 칩대구 및 구대칩전극의 경우 전극간격 1.9~2.5mm 사이에서 칩대칩전극과 같은 최저의 착화 에너지가 필요했다.

3) 구대구전극의 경우는 1.9mm 한 곳에서만 최소치를 나타내며 최소착화 에너지도 2.7mJ로 칩대칩 전극보다 훨씬 높았다. 그러나 1.1mm에서는 12.8mJ 이상의 에너지를 주어야만 착화 폭발함을

알았다.

4) 평판대 평판전극의 경우 구대구전극과 비슷한 경향을 나타내고 있으나 전극간격 1.1mm에서 3.2mJ이라고 하는 낮은 최소 착화에너지에서 착화폭발하였다.

5) 상대습도의 증가에 따라 착화전압의 변화는 그다지 크지 않았다.

6) 접지 저항의 증가에 따라 높은 착화전압이 필요하다.

참 고 문 헌

1. 産業安全研究所編, 靜電氣安全指針, 勞働省産業安全研究所, 1978.
2. 水谷幸夫譯, 基礎燃燒學 p.151. 森北出版, 1973.
3. N. Gibson and F.C Lloyd, Br. J. Appl. phys., 16, 1619, 1965.
4. 靜電氣學會編, 靜電氣ハンドブック, p752, オ-ム社, 1981.
5. 이 관형, 『靜電氣에 의한 火災·爆發災害의 豫防』 韓國産業安全公團 産業安全研究院 研究報告書 기전연 94-6-8. 1994.
6. 靜電氣學會編, 靜電氣ハンドブック, p757, オ-ム社, 1981.
7. 장영민, 정재희, 이관형, 차영식, 정춘기, 이덕출, 韓國産業安全學會誌, vol. 10, No. 1, pp20~27, 1995.
8. Yasuyuki Tabata and Teruo Suzuki, Journal of Electrostatics, 30, pp. 93~102, 1993.