

可燃性 混合物質의 最小 點火 Energy에 미치는 靜電氣의 影響에 관한 研究(I)

1996. 12. 31



한국산업안전공단
KOREA INDUSTRIAL SAFETY CORPORATION
산업안전연구원
INDUSTRIAL SAFETY RESEARCH INSTITUTE

提 出 文

韓國産業安全公團 理事長 貴下

본 報告書를 産業災害 豫防技術의 研究 開發 및 普及 事業의 일환으로 遂行한 “可燃性 混合物質의 最小 點火 Energy에 미치는 靜電氣의 影響에 관한 研究 (I)”의 最終 報告書로 提出합니다.

1996年 12月 31日

主管 研究部署: 産業安全研究院
機電安全研究室

研究責任者: 室長 李寬珩

參與研究者: 先任研究員 崔相源

研究助員: 電氣實驗室 技能員 車英植
忠北大學校 大學院 高殷泳

共同研究機關: 서울産業大學校
(研究責任者: 教授 鄭載喜)

要約文

1. 課題名 : 可燃性 混合物質의 最小 點火 Energy에 미치는 靜電氣의 影響에 관한 研究 (I)

2. 研究 期間: 1996년 1월 1일 ~ 1996년 12월 31일

3. 研究 目的

可燃性 또는 爆發性 物質을 취급하는 事業場에서 靜電氣에 의한 火災·爆發 事故가 빈번하게 발생하여 우리나라 産業災害의 主要 要因으로 대두되고 있음. 그러나 靜電氣에 의한 火災·爆發을 일으키는 最小 點火 에너지는 單一 成分의 物質에 대해서는 알려져 있으나 두가지 이상의 成分이 있는 混合物質에서는 아직 규명되어 있지 못하고 있어 이와 대한 障·災害 豫防對策을 수립하는데 많은 어려움을 야기하고 있음. 본 연구에서는 국내 事業場에서 많이 사용하고 있는 可燃性 混合物質의 最小 點火 에너지를 규명하여 靜電氣에 의한 火災·爆發 災害를 減少시키는데 기여코자 함. 또한 본 研究를 韓·日間의 共同研究事業의 일환으로도 추진하여 향후 兩國間 관련분야 研究協力의 礎石을 이루고자 함.

4. 必要性

- 1994년도 産業災害 統計에서 火災·爆發이 차지하는 比率은 전체 産業災害의 3.14%로 그다지 높은 比率을 차지하고 있지는 않으나 靜電氣가 點火源이 되어 발생하는 火災·爆發은 다른 産業災害에 비하여 死亡率이 높고 爆發後 2차적인 火災를 同伴하기 때문에 被害額이 엄청나게 커질 우려가 있으므로 事前에 이를 效果的으로 豫防하는 것이 매우 중요함.
- 그러나 靜電氣에 의한 火災·爆發을 일으키는 最小 點火 에너지와 點火 特性은 현재까지 單一 成分의 物質에 대해서는 잘 알려져 있으나 두가지 이상 成分의 混合物質 (混合가스 또는 粉塵)에서는 아직 명확하게 糾明되어 있지 못하고 있음. 그러나 실제로 産業現場에서는 單一物質보다는 可燃性 物質이 混合되어 사용되고 있으므로 事業場의 靜電氣에 의한 火災·爆發 災害를 豫防하기 위해서는

可燃性 混合物質의 最小 點火 에너지 및 靜電氣 點火 Mechanism을 說明하는 研究가 必要함.

- 또한 본 研究는 韓·日間의 共同研究의 일환으로도 추진하고 있는 課題로서 향후 兩國間 관련분야 研究協力의 초석이 될 것이며 日本의 産業安全 분야의 先進 技術을 傳受 받는데도 크게 도움이 될 것임.

5. 研究 內容 및 結果

- 可燃性物質의 點火·爆發 實驗裝置 設計 및 製作 設置
 - 模擬 靜電氣의 充電 및 放電 裝置
 - 點火電極 및 爆發桶
 - Gas 送·配給 및 混合裝置
 - 測定 Data 記錄 등 Data 處理裝置
- 靜電氣 放電과 可燃性物質의 點火·爆發 Mechanism 考察
 - 靜電氣의 放電과 可燃性氣體의 點火
 - 火災·爆發의 要因
 - 火災·爆發의 Mechanism
- 可燃性 混合氣體의 點火 Energy의 測定
 - 二成分 可燃性 氣體의 點火 Energy 測定
 - Methane-空氣, Propane-空氣, Ethylene-空氣, 水素-空氣
 - 三成分 可燃性 混合氣體의 點火 Energy 測定
 - Methane-Propane-空氣, Propane-Ethylene-空氣, Methane-Ethylene-空氣
 - Methane-水素-空氣, Propane-水素-空氣, Ethylene-水素-空氣
- 可燃性 混合氣體의 最小點火 Energy의 算定
 - 混合氣體의 成分比 - 點火 Energy 曲線의 Plot化
 - 混合氣體의 最小 點火 Energy의 算定
 - Methane-Propane-空氣, Propane-Ethylene-空氣, Methane-Ethylene-空氣
 - Methane-水素-空氣, Propane-水素-空氣, Ethylene-水素-空氣

6. 研究結果의 活用計劃 및 期待效果

○ 活用 計劃

- 石油化學工場 등 可燃性物質 取扱 事業場에 技術資料로 普及 活用
- 관련 學會/學術誌에 발표하여 弘報 및 技術 Data로 提供
- 公團 敎育院 및 관련 事業場의 敎育資料로 活用

○ 期待 效果

- 石油化學工場 등 可燃性物質 取扱 事業場의 靜電氣로 인한 火災·爆發 災害의 減少에 寄與
- 우리 公團 최초의 學·研 共同研究 및 韓·日間 國際 共同研究 事業으로 遂行하여 國內에서의 研究結果의 波及效果가 크고, 향후 韓·日間 관련분야 技術情報 交流 등 研究協力 活性化 基盤 造成

여 백

목 차

要約文	i
1. 머리말	1
2. 靜電氣의 放電과 點火 에너지	4
2.1 靜電氣의 放電	4
2.2 靜電氣 放電에 의한 可燃性 氣體의 點火	12
3. 火災·爆發의 要因 및 Mechanism	18
3.1 燃燒·爆發의 要因	18
3.2 燃燒·爆發의 Mechanism	31
4. 測定 實驗 裝置의 構成 및 設置	41
4.1 點火 Energy 測定 實驗 裝置의 構成	41
4.2 測定 實驗 裝置의 部分別 主要 사양	44

5. 實驗 方法 및 實驗 結果 分析	54
5.1 實驗 方法	54
5.2 測定點의 決定方法	60
5.3 實驗 結果 및 分析	62
6. 맺음말	69
附錄 A: 靜電氣의 帶電	72
附錄 B: 點火性 放電의 發生 防止	77
參考文獻	83

1. 머리말

産業 現場에서 일어나는 靜電氣에 의한 여러 가지 災害중에서 가장 큰 比重을 차지하고 있는 것은 火災·爆發이다. 化學工場이나 精油工場은 물론이고 製材所나 製粉工場, 纖維工場과 같은 可燃性 物質이 있는 장소에서는 어디서나 靜電氣가 點火源으로 作用하여 火災·爆發을 일으켜 大型 災害를 誘發할 수가 있다. 이러한 火災·爆發 災害는 生産活動에 막대한 支障을 招來할 뿐더러 때로는 勤勞者의 貴重한 生命을 위협하고 企業 財産에 커다란 損失을 招來하게 된다.

人體에 蓄積되는 小量の 靜電氣는 보통의 경우 단지 귀찮은 일에 불과할 수 있다. 그러나 點火에너지가 낮은 可燃性 氣體나 粉塵이 존재라는 可燃性 混合氣體가 존재하는 危險地域 (이하 ‘可燃性 雰圍氣’라 한다.)이나 爆發性 物質을 취급하는 地域에서는 人體에 帶電된 靜電氣가 放電될 경우 火災·爆發의 點火源으로 作用하여 심각한 災殃을 유발할 수도 있다.

더욱이 近來에 와서는 産業의 發達에 따라 合成樹脂, 合成纖維, 고무 등의 石油化學 製品 그리고 각종 油類, Gas 등의 生産 및 使用이 날로 늘어나서 靜電氣가 發生할 수 있는 素地가 현저하게 增加하고 있다. 뿐만 아니라 産業의 高度化는 靜電氣의 發生 Mechanism을 複雜하게 하여 이로 인한 障·災害의 豫防을 더욱 어렵게 하고 있다.

可燃性 氣體로서는 水素, Methane, Ethylene, Propane 등 常溫에서 氣體인 物質뿐만 아니라 可燃性 液體의 蒸氣, 예를 들면 Ester, Benzene 등을 모두 포함한다. 이들 可燃性 氣體가 空氣 (또는 酸素)와 混合하여 形成된 混合氣體의 組成이 燃燒 下限界와 燃燒 上限界로 불리는 濃度 範圍 (이를 燃燒範圍 또는 爆發範圍라고 한다.)안에 있게 되어 충분한 Energy를 가진 點火源에

의하여 點火될 경우 爆發을 일으키게 된다. 爆發은 混合氣體 안에서 시작된 火焰이 짧은 시간에 빠른 速度로 傳播하여 일어나는 현상으로서 그 傳播 速度에 따라 흔히 轟音과 壓力을 同伴하게 된다.

爆發範圍내에 있는 混合氣體 주변에서 靜電氣의 放電 (Electrostatic Discharge; ESD)이 일어날 경우, 그 放電 Energy가 충분히 크면 이 混合氣體를 點火시키게 된다. 좀더 엄밀하게 말하면, 電氣 Energy가 放電에 의하여 熱, 빛, 壓力 등의 Energy로 變換되고 그 중에서 熱 Energy가 發火를 일으키게 되는 것으로 放電 Energy 전부가 點火 Energy가 되는 것은 아니다. 그러나 대부분의 放電 Energy가 熱 Energy로 변환되기 때문에 靜電氣 放電에 있어서는 點火에 필요한 放電 Energy를 點火 Energy로 보고 있다.

放電은 高壓 電氣에 의한 氣體의 絶緣 破壞 현상으로서 그 放電 經路의 형성은 電極의 構造, 電壓의 인가 방법, 氣體의 壓力 및 溫度 등에 따라 다르고, 放電의 형태에 따라 熱 Energy의 발생도 판이하다. 그러므로 電氣의인量에서 點火 Energy를 구할 경우 이 실험이 실시될 때의 여러 가지 조건들을 면밀히 조사 분석할 필요가 있다.

그동안 可燃性 Gas에 대한 最小 點火 Energy 및 點火 메커니즘에 관한 연구는 꾸준히 진행되어 왔다. 그러나 單一 成分의 可燃性 가스인 경우에만 局限된 연구가 진행되어 오고 있어 두 가지 이상의 成分이 혼합된 可燃性 混合氣體의 最小 點火 Energy 및 點火 Mechanism에 관한 연구는 아직 이루어지지 않고 있다. 본 研究는 이러한 混合氣體의 最小 點火 Energy 등을 규명하기 위한 研究의 첫 段階로서 수행하였다. 研究의 效率的인 遂行을 위해 韓·日 共同研究 및 學·研 共同研究의 형태로 수행하였다. 즉, 日本 勞働省의 産業安全研究所와 더불어 국내에서는 우리 研究院과 함께 서울産業大學校의 鄭載喜 教授가 참여하여 본 研究를 수행하였다. 이 報告書에서 언급된 理論중 상당한 부분이 日本側 共同 研究者인 日本 産業安全研究所의 Y. Tabata 博

士와 T. Kodama씨에 의하여 提供되었다는 점을 밝혀 두고자 한다^{[4],[5],[6]}.

靜電氣의 帶電 및 放電 現象 등과 같은 靜電氣에 관한 일반적인 사항은 本 報告書에서는 간략히 언급하고자 하며, 詳細한 內容은 本 報告書 末尾에 열거된 여러 文獻들을 참고하기 바란다. 특히 本 研究責任者가 1993년과 1994년에 遂行했던 靜電氣 관련 研究의 報告書들^{[1][2]}을 참고하기 바란다.

本 研究가 可燃性 混合가스로 인하여 爆發性 霧圍氣가 많이 존재하는 化學工場 등 事業場에서 靜電氣를 點火源으로 하여 發生하는 火災·爆發 災害를 豫防하는데 기여할 수 있게 되기를 희망한다. 향후 本 研究가 더욱 보완되어 보다 완벽한 데이타를 제시할 수 있게 되기를 바라며, 계속해서 可燃性 粉塵 混合物 및 粉塵-Gas 混合物의 最小 點火 Energy를 糾明하는 研究도 遂行하게 되기를 희망한다.

2. 靜電氣의 放電과 點火 에너지

靜電氣가 放電될 때 放出하는 放電 Energy는 可燃性 混合氣體가 存在하는 爆發性 雰圍氣에서는 點火源으로 作用하여 火災·爆發을 일으킬 수가 있다. 이 章에서는 이러한 靜電氣의 放電 Energy와 可燃性 氣體의 點火와의 關係를 살펴보고자 한다.

2.1 靜電氣의 放電

可燃性 物質의 點火 問題를 취급할 때 중요한 것은 어느 정도의 Energy가 가해져야 點火가 일어나는가 하는 문제인데, 대개의 경우 가해진 Energy의 크기는 알더라도 그 중 어느 정도가 點火를 위해 吸收된 것인가는 잘 알 수가 없다. 이런 관점에서 點火源으로서 여러 形態의 Energy가 있지만 불꽃 放電은 대부분의 Energy가 熱Energy로서 有效하게 소비되고 있어 點火 Energy의 限界量을 定量的으로 구하는 것으로는 불꽃 放電이 가장 적합하다.

放電은 高壓 電氣에 의한 氣體의 絶緣 破壞 現象으로서 電氣 Energy가 熱, 빛, 壓力, 電磁波 등으로 변환되는 過程이라고 볼 수 있다. 大氣중에 놓여진 平等 電界의 경우, 인가電壓을 증가시켜 가면 暗流에서 불꽃放電이 발생하고, 電源에 電力 供給 能力이 있으면 Arc 放電 또는 Glow 放電으로 移行한다. 爆發性 氣體의 點火에는 불꽃 放電이 문제가 된다.

不平等 電界의 경우는 暗流에서 Corona 放電 또는 불꽃放電으로 移行하여 이 모든 放電의 點火性이 문제가 된다.

物體에 帶電되어 있는 靜電氣는 大地나 다른 物體로 放電할 때에 災害를 유발할 수 있다. 靜電氣 放電의 形態는 여러 가지로 區分될 수 있고, 이에 따

라 點火 能力도 차이가 나게 된다. 여기서는 몇 가지 代表的인 形態의 放電에 대해서 그 특성을 살펴보기로 한다.

(1) 불꽃(Spark) 放電

불꽃(Spark) 放電은 液體 또는 固體 導體 사이에서 일어나는 放電으로서, 高密度의 電流를 동반하고 閃光을 발생하는 특징이 있다. 이 放電은 매우 빠르게 진행되고 날카로운 소리를 내기도 하는데, 氣體의 Ion化가 全 放電 期間에 걸쳐 일어난다.

불꽃 放電은 두 導體간의 電氣場의 세기가 崩壞세기 (Breakdown Strength)라고 불리는 수준을 초과할 때에 이 導體들 사이에서 일어난다. 이 Breakdown 세기는 Gap 간격에 따라 달라진다. 平面 또는 曲率 半徑이 큰 표면 사이에서는 10 mm 정도 떨어져 있을 경우 이 세기는 약 3×10^3 kV/m 정도이며, Gap 간격이 증가함에 따라 증가한다.

불꽃 放電에서 관계되는 物體는 導體이므로 모든 電荷는 Spark에 흡수되어 실체에 있어서 靜電氣가 갖는 모든 潛在 Energy를 放出시킨다. 이 때 放出되는 放電 Energy는 다음과 같이 주어진다.

$$E = \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2.1)$$

여기서, E = 放電 Energy [J]

Q = 帶電되어 있는 靜電荷의 量 [C]

V = 帶電 電壓 [V]

C = 帶電 物體의 靜電容量 (Capacitance) [F]

이 Energy는 最大值로서 放電 經路에 抵抗이 있으면 Spark에서 消盡되는

Energy는 작아진다.

氣體중에 놓여진 電極間에 電壓을 인가한 경우 放電 空間에서 發光은 보이지 않는 정도의 電界에서도 電流가 흐르는데 이것을 暗電流라고 부른다. 이것은 보통 狀態의 氣體중에서도 宇宙線과 放射性 物質로부터 나오는 放射線에 의하여 中性인 氣體 分子가 電離가 되어 이것이 인가 電壓에 의하여 空間을 移動하기 때문이다. 어느 정도 이상으로 電界의 세기를 증가시키면 飽和 電流가 된다. 電界 強度를 더욱 올려 가면 급격히 電流가 증가하는데 이것은 空間을 이동하는 電子가 電界에 의하여 加速되어 큰 Energy를 갖게 되고 中性子와 충돌하여 氣體의 電離 作用이 생기게 하기 때문이다. 이렇게 電子가 電離 作用을 일으키고 점점 數가 늘어나는 作用을 α 作用이라 부른다. 또한 正 Ion이 陰極에 충돌하여 二次 電子를 放出시키는 作用을 γ 作用이라고 부른다. 이들 作用에 의하여 平行板 電極間을 電流 密度 J 는 다음 式으로 나타내어진다^[4].

$$J = \frac{e N_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (2.2)$$

여기서 e : 素電荷, N_0 : 陰極에서의 電子의 數, d : 電極間 距離.

이 電流는 外部로부터의 要因에 의하여 α 作用과 γ 作用이 일어나고, 이 작용에 의하여 電流가 흐르기 때문에 外部 要因을 제거하면 이 電流도 消滅된다. 이러한 이유로 이 電流를 非持續 電流라 부른다.

式 (2.2)에서 分母가 0에 매우 근접할 경우, 즉

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) \approx 1 \quad (2.3)$$

이면, 電流는 엄청나게 커져 불꽃放電으로 移行한다. 이 Model은 Townsend에 의하여 제시된 것으로서, 氣壓이 낮고 Gap이 짧은 電界에서 電荷에 의한

電界의 뒤튐림이 무시될 수 있는 경우에는 有效하다.

불꽃 放電의 開始 電壓은 그림 2.1에서 보여지는 바와 같이 Paschen이 실험적으로 구한 Paschen의 法則에서 알 수 있듯이 pd , 즉 壓力과 電極間 距離의 곱과 관계가 있다. 이에 의하면 空氣의 最小 불꽃 放電 開始 電壓은 327 V, 이 때의 $pd = 0.567 \text{ Torr}\cdot\text{cm}$ 로부터 大氣壓에서 放電 間隔은 약 $7.5 \mu\text{m}$ 이다^[5].

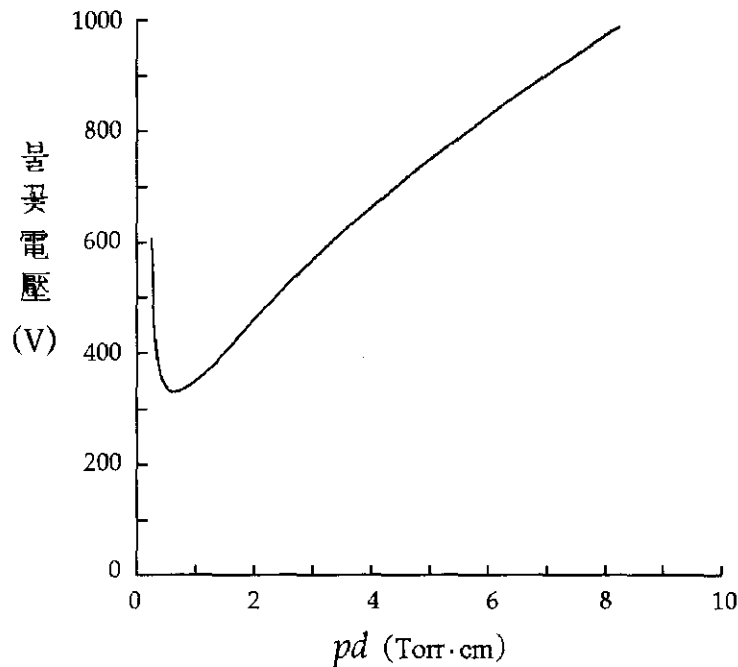


그림 2.1 空氣의 불꽃電壓에 관한 Paschen의 法則

Townsend 理論이 적용되는 것은 $pd < 1500 \text{ Torr}\cdot\text{cm}$ (2000 N/m) 로서 大氣中에서는 $d = 1 \sim 2 \text{ cm}$ 이하의 경우이다. 이 이상의 Gap에서는 Streamer 불꽃 放電이 일어난다. 이 이론을 간략히 설명하면, 負(-) Streamer의 경우는 陰極에서 출발한 電子는 電子기울음을 일으키고 陽(+) Ion을 남긴 채 陽極으로 향한다. 이 때 陰極에 남겨진 陽Ion은 γ 作用을 일으켜 電子를 방출시키

고 이 電子와 陽Ion이 Plasma 狀態를 형성한다. 負(-) Streamer는 전체적으로는 中性에 가까움으로 先端部の 電界強度가 증가하고 電離作用도 커지게 된다. 또한 이 때 光量子的 방출이 일어나는데 이 光量子가 中性氣體를 光電離시키고 그 電子가 새로운 先行 기울음을 형성한다. 이렇게 先行 기울음과 負(-) Streamer의 相互作用이 Relay式으로 연결되므로 매우 빠른 速度로 Streamer가 進展한다.

(2) Corona 放電

이것은 매우 작고, 뾰족한 끝이나 날카로운 모서리를 갖고 있는 導體에서 일어나는 放電 形態이다. 이 放電은 다른 物體를 指向할 수도 있고 大氣로 放散될 수도 있다.

뾰족한 形態 부근의 電氣場 세기는 매우 크고 거리가 멀어짐에 따라 급격히 감소한다. 뾰족한 끝부분에 있는 氣體는 이온화되고 이에 따라 電流가 導體를 흘러 나가게 된다. 그러나 이 점에서 멀리 떨어진 곳에서는 이온화가 불완전해지고 주변 氣體의 導電度에 영향을 받는 약한 電流가 생기게 된다. 이러한 現象을 Corona 放電이라고 하며, 켓소리와 희미한 불빛으로 특징지어진다.

Corona 放電은 오랜 기간 持續될 수도 있고, 짧고 조그만 폭발이 斷續적으로 일어날 수도 있다. 이 放電에서 수반되는 Energy 密度는 Spark 放電에 비하여 훨씬 작다. 특별한 경우에 있어서 뾰족한 導體의 電位가 증가하고 他 導體가 접근하면 Corona가 Spark로 발전할 수가 있다.

棒-平板과 같은 不平等 電界에서는 Corona 放電이라고 불리는 部分 絶緣 破壞가 존재한다. 不平等 電界를 형성하는 電極 構造에는 다양한 것들이 있다.

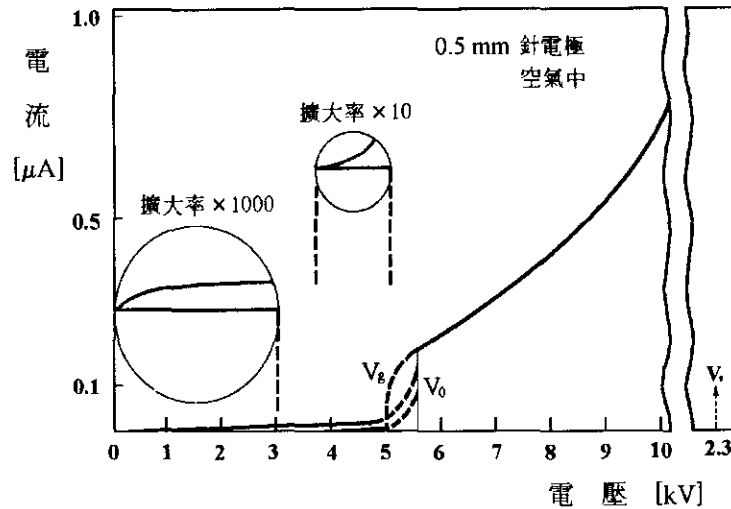


그림 2.2 針-平板 電極의 電壓-電流 特性

(V_0 : Corona 開始 電壓, V_c : 불꽃 開始 電壓)

棒-平板의 電極 構造에서 인가 電壓을 增加시켜 가면 어떤 電壓에서 電界가 集中되어 있는 先端部에서 빛과 함께 소리가 발생하며 電流값이 急上昇한다. 그 電流값의 變化 狀態가 그림 2.2에 나타내어져 있는데, 여기서 V_0 를 Corona 開始 電壓이라고 부른다. 이 Corona 전류가 흐르고 있는 狀態에서는 電界가 集中되고 있는 부분 즉 先端部 근처에서 電離가 일어나고 發光이 일어난다. 여기에서 발생한 電子와 陽 Ion중에서 Corona 電極 (曲率이 작은 電極)이 (+)인 경우는 陽 Ion이 電離 區域을 나와 반대편 電極으로 향한다. Corona 電極이 (-)인 경우 즉 負(-) Corona의 경우는 電子가 電離 區域에서 나와 반대편 電極으로 향하게 되나 氣體 分子에 付着하여 (-) Ion을 형성한다. 어떤 경우도 電離 領域 밖에서는 Ion의 흐름에 의하여 電流가 흐르게 되는데 單一 Ion이므로 空間 電荷를 형성하고 Corona 電極 근처의 電界를 弱화시키는 作用을 하므로 Corona 電流는 비교적 낮은 값으로 억제된다. 針-平板에서 針이 陽의 電極일 경우의 陽 Corona는 보통 暗流에서 Glow Corona

또는 Brush Corona로移行한다. 그 Corona의 開始 電壓은 先端의 曲率半徑과 Gap 길이와 관계한다. 負(-) Corona의 경우는 曲率半徑과 Gap 길이에 따라 暗流에서 불꽃으로 직접移行하는 경우와 暗流에서 Pulse性 Corona를 거쳐 불꽃으로移行하는 경우, 또는 暗流에서 Pulse性 Corona 및 定在性 Corona를 거쳐 불꽃으로移行하는 경우가 있다.

(3) 기타 放電

帶電이 되어 있는 不導體로부터 導體로 일어나는 放電으로서 **Brush 放電**이 있다. 이것은 Streamer 放電이라고도 하며 Corona 放電의 일종으로서 Corona 放電이 보다 進展하여 Brush狀의 發光을 수반하는 것을 구별하여 말한다. Brush 放電은 不導體 表面의 不連續的 부분에서 짧은 Spark 같은 放電의 形態를 취한다. 즉, 개개의 放電은 表面 위로 흐를 수 있는 電荷量에 의하여 제한 받는 조그만 Spark라고 볼 수 있는데, 전체적으로는 Brush 形態로 보인다. 만약 電流가 흘러 들어가고 있는 導體의 끝이 뾰족할 때는 그 導體에서의 放電은 Corona 形態를 취한다.

Brush 放電에서 局地 Energy 密度는 可燃性 Gas 및 蒸氣의 點火 能力을 갖기에 충분할 만큼 클 수가 있다. 그러나 실제 실험에서 이 Energy는 대략 4 mJ을 초과하지는 않는 것으로 나타나고 있다.

Brush 放電의 變形으로서 **進展性(Propagating) Brush 放電**이 있는데, 이는 兩面에 대량의 반대 極性の 電荷를 가진 板(Sheet) 型的 高抵抗 不導體에서 일어날 수 있다. 흔히 이 不導體板은 導體에 의하여 접속될 수 있는데, 중요한 것은 이 板이 兩極化되어 있고 充電된 Capacitor의 誘電體와 같은 상태로 되어 있다는 것이다. 만약 不導體 表面에 導體가 접근하게 되면 靜電氣에 의한 電氣場은 이 표면의 넓은 부분에 걸쳐 이온화를 촉진시키게 된다. 이에

따라 放電이 일어나게 되는데, 不導體의 광범위한 부분으로부터 電荷가 흘러나와 표면 주변의 Ion化된 Gas를 통하여 처음 放電이 시작된 점으로 들어간다. 이 결과 Gas 및 蒸氣뿐만 아니라 粉體까지도 點火시킬 수 있는 強烈하고 Energy가 큰 Spark를 내는 放電이 일어나게 되며, 따라서 이 進展性 Brush 放電은 매우 위험스럽다.

種類가 다른 絶緣物の 境界面, 흔히 볼 수 있는 것으로 氣體중에 놓여진 固體 表面을 따라서 進行하는 放電을 沿面 放電 (Creeping Discharge)이라고 부르는데, 이는 固體表面上的 電界强度가 큰 경우에 일어나는 것으로서 發光을 同伴한다. 그림 2.3과 같이 接地 電極위에 絶緣層을 두고 그 위에 針電極을 垂直으로 닿게 하여 電壓을 인가하면 絶緣體 表面위에 沿面 Corona가 발생된다. 針電極을

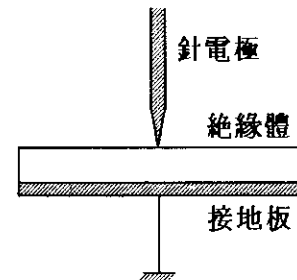


그림 2.3 沿面放電을 일으키는 電極 構造

제거한 후 樹脂와 酸化납 (Minium; Pb_3O_4)의 미세한 粉末을 散布하면 무늬가 얻어지는데, 이것이 Lichtenberg Figure라고 불리는 放電 圖形으로서 放電의 狀態를 어느 정도 관찰할 수 있게 해준다. 이 放電의 過程은 電極 近處의 絶緣體 表面에 隣接해 있는 氣體가 電離하여 沿面 Glow Corona가 나타나고, 電壓을 높여 주면 희미한 發光을 하는 沿面 Corona가 되며, 電壓을 더 높여 주면 沿面불꽃 Corona로 移行한다. 이 放電의 發生 및 進展은 表面의 狀態, 특히 表面의 導電率에 의하여 크게 좌우되며, 表面의 汚染 狀態와 大氣 溫度에 따라서도 달라진다.

沿面 放電은 導體에 밀착한 Film과 같은 얇은 絶緣體가 매우 높게 ($2.5 \times 10^{-4} \text{ C/m}^2$ 이상) 帶電되어 있는 상태에서 일어난다. 예를 들면, Back Filter 의해서 유동 건조 중에 높게 帶電한 粉體가 濾過布 또는 裝置 內壁에

부착되었을 때, 絶緣 코팅한 容器속에서 攪拌 또는 混合 操作중 絶緣被膜이 帶電되었을 때 등에 일어나는 수가 많다.

空間 電荷에 의한 放電은 雷狀放電 (Lightning Discharge)으로 대표되고 있는데, 이는 空間電荷雲에 의한 電界가 충분히 클 때 잘 일어나게 된다. 이 放電은 불꽃放電의 일종이나 번갯불처럼 공간에서 나뭇가지 모양의 發光이 수반되기 때문에 이렇게 부르고 있다. 이 放電은 매우 강하게 帶電한 粒子群이 커다란 구름 (帶電雲) 모양으로 분포되어 있는 상태에서 일어난다. 예를 들면, Silo 안에 많은 양의 粉塵이 浮遊할 때와 거대한 탱크를 Jet Nozzle을 이용하여 바닷물로 洗滌할 때 발생한다. 空間 電荷에 의한 放電에는 雷狀放電 외에도 Lenard 效果로 불리는 瀑布에서의 放電, Super Tanker 洗滌液중의 帶電된 Mist에 의한 放電, 粉體 爆發 등이 있다.

2.2 靜電氣 放電에 의한 可燃性 氣體의 點火

可燃性 氣體로서는 水素, Methane, Ethylene, Propane 등 常溫에서 氣體인 物質뿐만 아니라 可燃性 液體의 蒸氣, 예를 들면, Ether, Benzene 등을 모두 포함한다. 이들 可燃性 Gas가 空氣 (또는 酸素)와 混合하여 이 混合氣體의 組成이 濃度 範圍안에 있게 되면 點火할 경우 爆發을 일으킨다. 이는 混合氣體중에 있는 火焰이 一瞬間에 傳播하여 일어나는 것으로서 이 때의 可燃性 氣體의 混合氣體에 대한 組成比의 範圍를 爆發範圍라고 한다.

爆發限界내에 있는 混合氣體중에서 放電이 일어날 경우, 그 Energy가 충분히 크면 氣體를 點火시키는 것이 가능하다. 좀더 엄밀하게 말하면, 電氣 Energy가 放電에 의하여 熱, 빛, 壓力 등의 Energy로 변하고 그 중에서 熱 Energy가 發火를 일으킴으로 電氣 Energy 全部가 發火 Energy가 되는 것은 아니다. 그러나 대부분의 電氣 Energy가 熱 Energy로 變換하기 때문에 보통

點火에 필요한 電氣 Energy를 點火 Energy라고 하고 있다.

放電은 高壓 電氣에 의한 氣體의 絕緣 破壞 現象으로서 그 放電 經路의 形成은 電極의 構造, 電壓의 인가 方法, 氣體의 壓力 및 溫度 등에 따라 다르고, 放電의 形態에 따라 熱 Energy의 발생도 判異하다. 그러므로 電氣的인量에서 點火 Energy를 구할 경우 이 實驗이 실시될 때의 여러 가지 條件들을 면밀히 조사 분석하여야 한다.

(1) 불꽃 放電에 의한 點火

불꽃放電은 그 Energy가 비교적 크고 點火性이 강한 것으로 잘 알려져 있으며, 應用面도 넓어서 內燃機關의 點火 등에 널리 이용되고 있다. 지금까지 서술한 바와 같이 그 電氣的 Energy의 測定이 비교적 容易한 편이라 混合氣體의 點火 Energy의 測定에 이용되기도 한다.

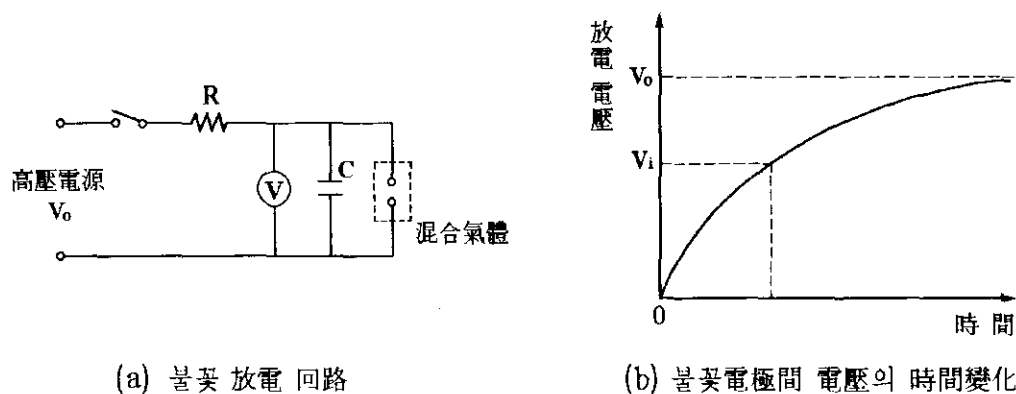


그림 2.4 불꽃 放電 回路와 放電 電壓의 變化

그림 2.4 (a)에 있는 回路에서, Condenser와 抵抗에 의한 時定數가 충분히 크면 放電 電極간의 電壓은 그림 2.4 (b)에 나타난 바와 같이 指數的으로 上昇한다. 만약 電極間 電壓 V_1 에서 放電했다고 하면 이 때의 放電 Energy W

는 다음과 같이 주어진다.

$$W = \frac{1}{2} C V_i^2 \quad (\text{J}) \quad (2.4)$$

여기서, C : 帶電 物體의 靜電容量 (F), V_i : 放電 開始 電壓 (V).

이 點火 Energy는 Gas의 種類, 濃度, 放電 電極의 形狀, 間隔, 電壓, 靜電容量, 壓力, 溫度에 따라 변화하므로 어떠한 條件 아래서 測定하였는가를 분명히 하지 않으면 意味가 없다. 電壓의 上昇率 등에 의한 放電 開始의 遲延을 방지하기 위해 放射線 또는 紫外線을 照射하여 均一化를 꾀하기도 한다. 중요한 의미를 갖는 것은 最小 點火 Energy (Minimum Ignition Energy; MIE)이므로 Gas의 種類, 濃度, 壓力, 溫도를 一定하게 한 狀態에서 電氣의 條件을 여러 가지로 변화시켜 가며 이 Energy를 구한다. 可燃性 Gas의 相對濃度を 변화시킨 경우에도 最小 點火 Energy는 이 濃度에 따라 변화한다. 여기에서 相對 濃度는 C/C_{st} 로서 나타내는데, C 는 可燃性 Gas의 濃度, C_{st} 는 過不足 없이 化學反應이 행해지는 濃度인 化學量論 濃度이다.

(2) Corona 放電에 의한 點火

Corona 放電은 不平等 電界중에서 발생하고 보통 電流가 작으며 點火 能力을 가질 수 있다. 불꽃放電과 마찬가지로 Gas의 種類, 濃度 등의 관계되며, 이 외에 放電의 狀態에 따라 그 點火 能力의 차이가 있다. 특히 Corona 放電의 경우는 極性이 중요한 요인으로 작용하여, 負(-) Corona보다 陽(+) Corona가 點火 能力이 더 강하다. 陽(+) Corona에서 電極 電壓을 증가시켜 가면, Glow Corona에서 Brush Corona로 진행하여 가는데, 이 경우 點火 能力이 높을 수 있다.

여러 種類의 電極의 曲率에 대한 點火 能力을 조사한 것이 그림 2.5에 나와 있다. 여기서도 陽(+) Corona가 負(-) Corona보다 點火 能力이 더 크 을 알 수 있다.

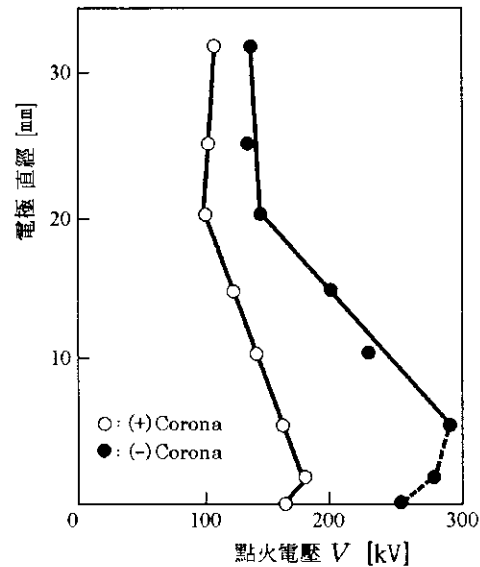


그림 2.5 Corona 放電의 點火 電壓과 電極 直徑의 관계

(3) 面電荷 放電에 의한 點火

導體간의 放電의 경우, 蓄積 電荷 全部가 放電하므로 放電 Energy를 간단히 구할 수 있지만, 그림 2.6에 보여지는 바와 같은 絶緣 體上의 電荷와 導體間의 放電의 경우는 面 上의 電荷가 모두 放電한 때를 제외하고는 이 를 구하는 것이 쉽지가 않다. 絶緣物의 面積이 큰 경우는 放電에 의하여 中和되는 電荷는 일부분에 불과하다. 간단히 하기 위하여 導體를 球形이라고 가정하면, 表面 電荷와 導體球의 放電은 放電 開始前의 電界 分布, 특히 球上의 電界強度가 중요한 要因이 된다.

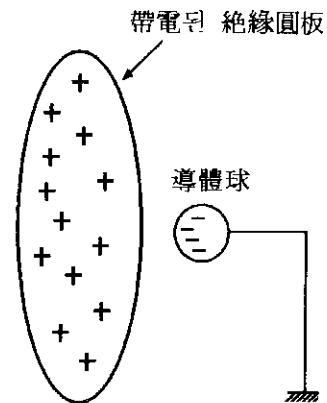


그림 2.6 帶電 圓板과 導體球의 放電 裝置

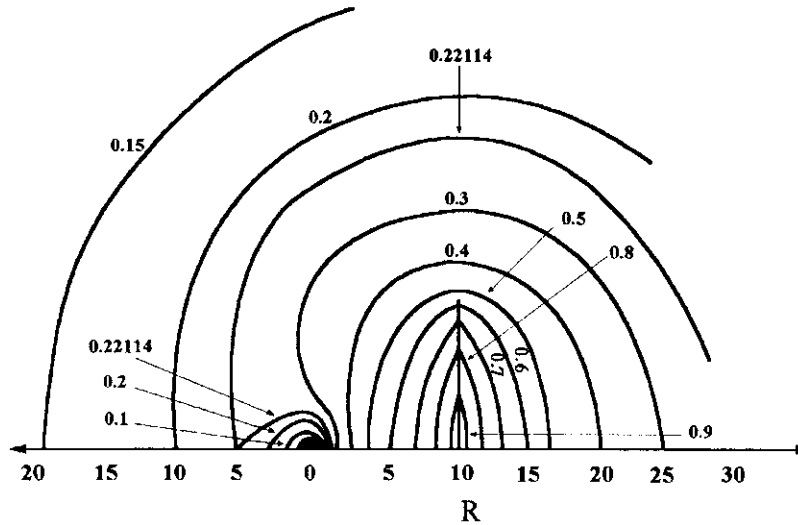


그림 2.7 帶電 圓板과 接地球間의 電位 分布

表面 電荷 密度가 똑같은 경우의 電界 分布의 計算例가 그림 2.7에 나와 있는데, 여기서 알 수 있듯이 球위에서 絶緣物에 面하여 있는 點의 電界强度가 가장 크다. 放電 開始는 주로 이 點의 電界强度에 의하여 좌우된다. 放電이 시작된 후의 樣相은 잘 알려져 있지는 않지만, 絶緣物 表面상의 中心軸 부근의 電荷가 放電 開始에 의하여 中和되면, 表面위에서는 放射 方向의 電界强度가 크게 되고 이에 따라 沿面 放電을 일으키는 것으로 생각된다. 또한 表面위의 電位가 같지 않으므로 放電 開始前의 蓄積 Energy도 간단히 구할 수 없다.

이러한 電極 形狀에서의 放電에 의한 點火性을 알아보는 實驗이 실시되고 있는데, 放電의 形態는 Brush Corona 放電으로 나타나고 있다.

(4) 空間電荷의 放電에 의한 點火

面上 電荷에 의한 放電의 點火性도 糾明하기가 어렵지만 空間電荷에 의한 放電은 3次元的인 문제이므로 다루기가 더욱 어렵다. 空間電荷에 의한 放電은 雷狀放電을 비롯하여 여러 種類가 있으나 實驗的인 必要性에서 그 點火性을 調査한 것은 최근의 일이다. 특히 Tank 또는 Tank Lorry 등의 爆發과 관련하여 石油産業 分野에서 연구가 활발히 進行되고 있다.

Tank속에 있는 帶電된 液體와 接地되어 있는 球의 放電도 空間電荷에 의한 放電으로 볼 수 있는데, 이 때의 電荷量이 어떤 값을 超過하면 點火·爆發이 일어난다. 이 측정에 의해서도 移動 電荷量은 대략 $0.1 \mu\text{C}$ 이므로, Propane-空氣의 混合物에서 약 3 mJ 의 Energy를 요하는 것이 된다. 이것은 最小 點火 Energy에 비교하면 상당히 큰 量이다. 球 電極의 直徑과 液面 電位의 關係를 그림 2.8에 나타냈다. 즉, 이 실험에 의하면 液面 電位가 약 60 kV 이상에서 點火·爆發이 일어난다.

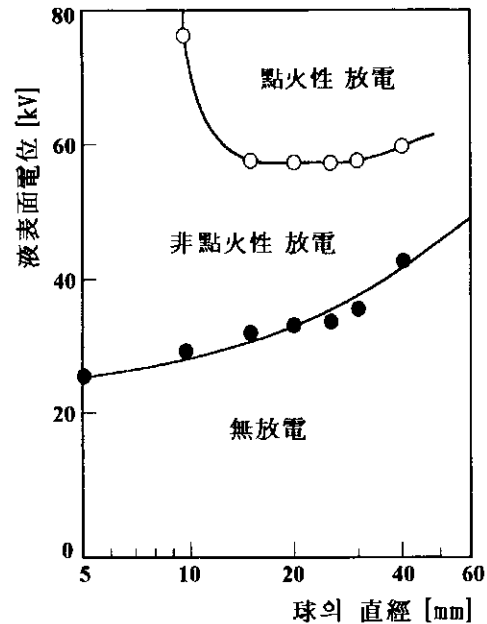


그림 2.8 點火에 미치는 球의 直徑과 表面電位の 關係

3. 火災·爆發의 要因 및 Mechanism

靜電氣가 帶電되어 있는 物體가 어떠한 原因으로 放電될 경우 이때 發生하는 Energy는 주변에 있는 可燃性 物質의 點火源 역할을 하여 火災·爆發을 일으킨다. 産業의 발달에 따라 量産되거나 새로 開發되고 있는 高分子 化合物은 靜電氣의 發生을 매우 容易하게 하여 이러한 火災·爆發 災害의 危險性은 날로 증대하고 있다. 이 章에서는 이러한 火災·爆發의 危險性을 낮추기 위하여 그 要因과 發生 Mechanism에 대해서 考察해 보고자 한다.

3.1 燃燒·爆發의 要因

3.1.1 燃燒·爆發의 條件

可燃性 가스 및 蒸氣, 粉體 등이 空氣와 같은 支燃性 物質과 混合되어 그 混合 濃도가 燃燒 範圍 안에 있을 때 어떤 點火源에 의하여 충분한 Energy가 供給되면 點火되어 火災·爆發을 일으킨다. 즉, 靜電氣의 影響으로 일어날 수 있는 火災·爆發은 일반적으로 다음과 같은 3가지 條件이 동시에 충족될 때에 일어난다.

- ① 可燃性(爆發性) 混合物 (Explosive Mixture)이 존재하고 그 混合 濃도가 爆發 (燃燒) 範圍內에 있다.
- ② 帶電物體 (보통 接地가 되지 않은, 즉 絶緣되어 있는 不導體)가 存在하고, 충분한 量의 靜電氣 電荷가 蓄積되어 있다.
- ③ 그 場所에 存在하는 可燃性 物質의 最小 點火 에너지 (Minimum

Ignition Energy; MIE)보다 큰 放電 Energy를 放出하는 靜電氣 放電이 일어난다.

따라서 可燃性 物質의 靜電氣에 의한 點火·爆發은 可燃性 物質의 濃도가 燃燒範圍 안에 있고 이 混合物의 最小 點火 Energy를 초과하는 에너지를 放出하는 靜電氣 放電이 일어날 때 발생한다. 그러므로 적절한 防護對策을 강구하여 위의 條件들 가운데 적어도 한가지만이라도 확실하게 제거하여 이 條件들이 동일한 場所에서 동시에 만족되지 않도록 하면 火災·爆發은 豫防할 수 있다.

3.1.2 爆發性 混合氣體의 燃燒範圍

燃燒 過程에서 可燃性 物質은 酸化劑와 작용하여 Energy를 방출한다. 酸化劑는 物質의 燃燒作用에서 필요로 하는 酸素 Ion을 낼 수 있는 물질로서, 보통 空氣이지만, 空氣보다 酸素를 다소 더 포함한 다른 氣體 混合物도 될 수 있다. 이러한 酸化劑를 支燃性 氣體라고도 부른다. 반면에 靜電氣 放電이나 다른 點火源에 의하여 空氣가 없이도 급격한 發熱反應이 일어날 수 있는 混合物이나 混合體가 있는데 이러한 것을 爆發物이라고 하며, 여기서는 다루지 않기로 한다.

可燃性 氣體 또는 可燃性 液體의 蒸氣가 空氣 또는 酸化劑와 混合하여 混合氣體의 組成이 있는 濃度範圍에 있을 때 이것에 點火하면 火焰이 傳播하고 氣體 爆發을 일으킨다. 이 때의 組成 限界를 可燃限界, 爆發限界, 또는 燃燒限界(範圍) 등으로 부른다.

그림 3.1은 일정한 壓力條件下에서 可燃限界와 溫度와의 관계를 나타낸 概念圖이다. 可燃性 霧圍氣의 溫度가 상승하면 下限界의 濃度は 減少하고 上

限界의 濃度는 增加하여 可燃範圍가 넓어지게 된다. 따라서 충분히 溫度가 상승하면 自然發火 領域이 나타난다. 또, 溫度가 低下하고 飽和蒸氣壓 曲線 이하의 溫度에서는 可燃性 蒸氣의 凝縮이 시작되어 蒸氣와 空氣의 混合物 중에 미세한 물방울 즉 Mist가 형성되며, 이에 따라 Mist가 浮遊한 상태의 爆發性 混合氣體가 된다.

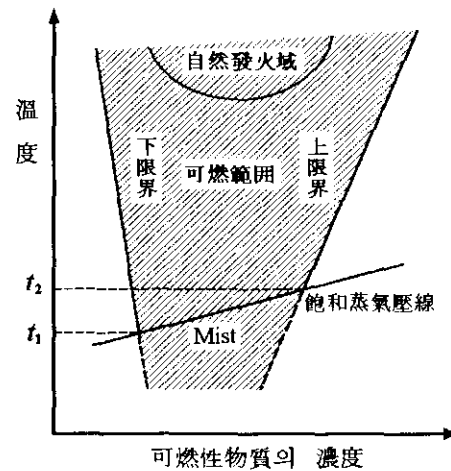


그림 3.1 燃燒範圍와 溫度의 關係

Gas나 粉塵 형태의 可燃性 物質의 空氣중 混合物은 그 成分比가 燃燒 下限界 및 燃燒 上限界라고 불리는 두 限界 內에 들어 있어야 燃燒가 일어날 수 있는데, 이 限界値는 粉塵의 경우는 1 m^3 속에 포함되어 있는 粉塵의 무게 (g/m^3)로 나타내어지나, Gas의 경우는 空氣중의 可燃性 物質의 부피 濃度 (vol.%)로 나타내어진다. 즉, 混合 濃度는 可燃性 物質의 立場에서 혼합된 정도를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{混合濃度} = \frac{\text{可燃性物質의 量}}{\text{可燃性物質의 量} + \text{支燃性物質의 量}} \times 100 \quad (3.1)$$

여기서 量이 부피 (Volume)로 주어질 경우, 單位가 vol.%로 표시된다.

爆發性 混合氣體를 형성하는 混合氣體가 可燃性 氣體와 支燃性 氣體 (酸化劑)의 二成分으로 되어 있는 경우에는 上限界 및 下限界 濃度値로 可燃範圍를 나타내는 것이 가능하다. 이 限界値들 사이의 濃度の 範圍를 燃燒範圍라 하고, 이 範圍안에 있는 混合氣體를 흔히 可燃性 混合氣體 (Flammable Mixture Gas)라고 일컫는다. 대부분의 Gas는 燃燒範圍가 2 ~ 10 vol.%이지만 Acetylene, Ethylene 및 Hydrogen과 같이 燃燒範圍가 훨씬 넓은 物質들

도 있으며, 이런 物質들은 그만큼 더 위험하다고 볼 수 있다.

표 3.1 主要 可燃性 Gas 및 蒸氣의 引火点, 燃焼範圍 및 最小點火에너지

物 質 名	爆發限界 [vol.%]		引火点 [℃]	最小點火Energy (空氣中) [mJ]
	下限界	上限界		
Methane (CH ₄)	5.0	15.0	-187	0.30
Ethane (C ₂ H ₆)	3.0	12.4	-130	0.25
Propane (C ₃ H ₈)	2.1	9.5	-104	0.25
n-Butane (C ₄ H ₁₀)	1.8	8.4	-60	0.25
n-Hexane (C ₆ H ₁₄)	1.2	7.4	-3.9	0.28
Benzene (C ₆ H ₆)	1.3	7.9	-11.1	0.22
Methyl alcohol (CH ₃ OH)	6.7	36.0	12.2	0.14
水素 (H ₂)	4.0	75.6	-	0.017
Ethylene (C ₂ H ₄)	2.7	36.0	-	0.07
Acetylene (C ₂ H ₂)	2.5	100.0	-	0.017
二黃化炭素 (CS ₂)	1.3	50.0	-30	0.015

주요 可燃性 物質 (Gas 및 液體)의 爆發範圍 (燃焼範圍)는 표 3.1과 같다. Gas 또는 蒸氣와 空氣의 混合氣體의 燃焼範圍는 周邊 溫度의 上昇에 따라 더 확장된다. 즉, 周邊 溫度가 上昇함에 따라 常溫때와 비교하여 燃焼 下限界는 더 낮아지고 燃焼 上限界는 더 올라간다. 이는 混合氣體의 可燃性이 溫度의 上昇에 따라 增加함을 의미한다.

일반적으로 靜電氣 放電 또는 다른 點火源에 의한 爆發 災害는 존재하는 可燃性 混合體를 除去함으로써 豫防할 수 있다. 이것은 可燃性 混合物의 濃度を 낮추기 위하여 外部 空氣와 換氣를 하거나, 不活性氣體 (Inert Gas)를 添加하는 것 등에 의하여 가능하다.

可燃性 氣體 및 液體의 點火 및 爆發에 관한 限界濃度 등의 特性値는 Coward 및 Jones에 의하여 처음으로 體系的으로 조사되어 學界에 그 結果가 報告되었다. Barnet 및 Hibbard는 約 200種의 可燃性 物質에 대해서 可燃範圍, 發火溫度, 燃焼速度, 最大點火에너지, 消焰距離 등의 Data를 제시했다. 그

후 Zabetakis가 이를 補完하여 약 200種의 可燃性 物質에 대한 Data를 추가하였다. 일본에서는 柳生이 300種 以上の 可燃性 物質의 可燃範圍에 미치는 添加物, 溫度, 壓力 效果 등의 상세한 자료를 많은 자료를 토대로 하여 정리하였다. NFPA에서는 數年마다 새로운 Data를 추가하여 발행하고 있는 “National Fire Codes” 중에 1500種 以上の 可燃性 物質의 引火點, 發火點, 可燃範圍 등의 特性値를 收錄하고 있다.

그러나 支燃性 物質을 포함하여 三成分 이상이 혼합되어 있는 可燃性 混合物에 대한 燃燒 限界値들이나 最小 點火에너지 등과 같은 特性値들은 현재까지는 나와 있는 자료가 없다. 이러한 이유로 이번 研究에서는 可燃性 混合物에 대한 最小 點火에너지를 규명해 보고자 시도한 것이다.

爆發性 混合氣體의 形成은 可燃性 氣體 및 蒸氣에 의한 경우 외에 앞에서 서술한 可燃性 液體의 Mist 및 可燃物의 粉塵이 空氣와 같은 支燃性 氣體 중에 浮遊하는 경우가 있어 噴霧爆發 및 粉塵爆發을 일으킬 위험이 있다. 噴霧爆發 및 粉塵爆發의 경우에도 氣體爆發과 같이 爆發限界濃도가 존재한다.

3.1.3 可燃性 混合物의 最小 點火 Energy

靜電氣가 放電할 때는 다음 식으로 주어지는 放電 Energy를 방출한다.

$$E = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} QV \quad (3.2)$$

여기서, E 는 放電 Energy (單位: J), C 는 靜電容量 (單位: F), V 는 帶電電壓 (單位: V), 그리고 Q 는 帶電된 靜電氣量 (單位: C)이다.

放電 Energy는 靜電氣量이 같아도 帶電 電壓이 높을수록 커진다. 또한, 物體面사이의 距離가 짧아질수록 靜電容量은 커지고, 멀어질수록 靜電容量이 감소하며 電壓은 높아진다. 空氣중의 放電에는 최소한 350 ~ 400 V 이상의

電壓이 필요하여 이보다 낮은 低電壓의 帶電은 그다지 위험하지 않은 것으로 알려져 있다.

靜電氣가 갖고 있는 Energy는 放電시에 여러 가지 형태를 통하여 外部로 放出한다. 대표적인 放電 形態가 불꽃(Spark)으로서 이는 液體 또는 固體 導體 사이에서 일어나며, 아주 짧은 시간에 高密度의 電流와 閃光을 동반한다. 靜電氣 放電에 따른 點火 能力을 평가하기 위해서는 이 放電 Energy와 可燃性 物質의 最小 點火 Energy를 비교하는 것이 보통이다. 그러나 放電 經路에 抵抗이 있으면 저장된 Energy의 일부분이 이 抵抗에서 放散되고 Spark 時間도 길어지게 되어 이들의 단순 比較는 유효하지 않을 경우가 있다.

날카로운 모서리를 갖는 導體에서 주로 일어나는 Corona 放電의 點火 能力은 Spark 放電의 경우보다 작다. 이러한 이유로 Corona 放電은 靜電氣를 除電하는 한 수단으로 사용될 수 있다. 可燃性 混合氣體가 존재할 우려가 있을 때는 이러한 靜電氣 除電 시스템을 설계하는데 있어 특별한 주의가 필요하다.

不導體에서 일어나는 Brush 放電의 경우는 點火 能力을 결정하는 일반적인 방법이 없다. 보통, 높은 表面抵抗이 電荷의 흐름을 방해하기 때문에 Energy의 放出率は 비교적 낮으나, 높은 Energy 密度를 가진 부분이 존재할 수 있어 다른 형태의 Corona 放電보다 點火性이 더 강할 수가 있다.

高抵抗 不導體板으로부터 발생하는 傳播 (Propagating) Brush 放電은 點火性이 매우 높다. 이 경우 不導體에 저장되는 全體 Energy量이 추산되면 이를 最小 點火 Energy와 비교하여 點火性을 판단할 수 있다.

靜電氣 放電이 可燃性 混合氣體를 點火시킬 수 있는지의 여부는 可燃性 混合氣體의 成分 및 溫度, 放電 Energy 및 이 Energy의 분포 등에 달려 있다. 현장에서 가장 흔한 點火源은 絶緣物로부터 생겨나는 Spark이며, 따라서

이 Spark가 點火 Energy를 측정하는데 있어 가장 널리 쓰여지고 있는 수단이 된다. 어떤 물체에 있어서 가장 낮은 點火 Energy는 空氣중 濃度の 函數로서 그림 3.2에서 보여지는 형태로 된다.

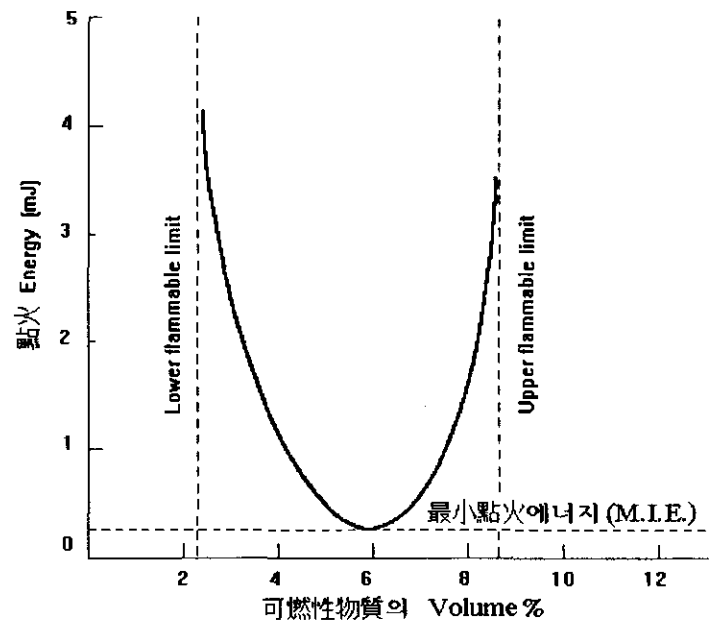


그림 3.2 空氣중 可燃性 物質의 濃도와 點火 Energy

이 곡선에서 가장 낮은 점에 해당하는 Energy가 最小 點火 Energy로서 可燃性 物體가 관련된 火災나 爆發을 유발하는데 필요한 最小 Energy量을 나타내는 가장 보편적인 尺度가 된다. 즉, 爆發性 混合氣體를 點火시키고, 火焰의 傳播를 일으키기 위해서 그 反應系에 주어져야 하는 Energy의 最少量을 最小 點火 Energy (Minimum Ignition Energy; MIE)라고 한다. 그림 3.3은 Hexane, Methane 및 Propane의 燃燒範圍와 最小 點火 Energy를 보여주고 있다.

Ethane, Butane과 같은 飽和 炭化水素 Gas나 蒸氣는 空氣와의 混合比가 最適일 때, 불꽃放電에 의한 放出 Energy가 0.25 mJ이면 點火되는 것으로

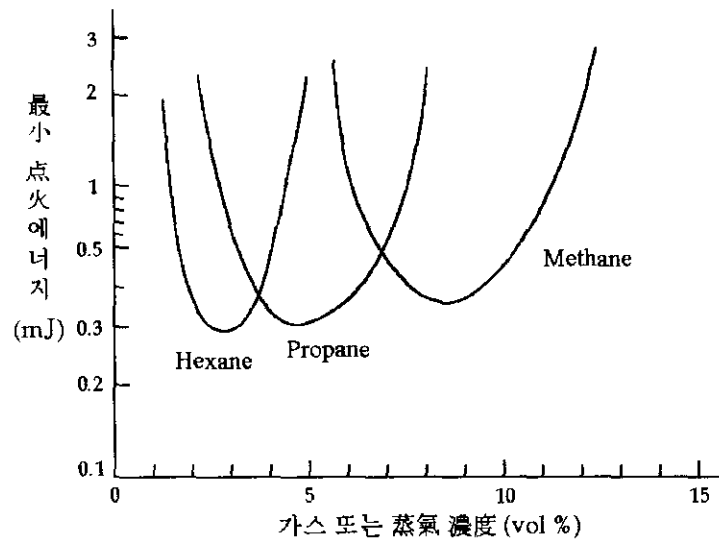


그림 3.3 可燃性 가스·蒸氣의 濃度와 最小 點火에너지

밝혀지고 있다. Ethylene, Acetylene 같은 不飽和 炭化水素는 이보다 훨씬 낮은 Energy에서도 點火 가능하다. Gas/空氣 混合體의 MIE는 대략 0.01 ~ 1.0 mJ의 범위에 있고, Gas/酸素 混合體의 MIE는 0.002 ~ 0.1 mJ의 범위에 있다. 爆發物의 最小 點火 Energy는 0.001 mJ까지 낮아질 수 있다. 주요 可燃性 物質 (液體 및 Gas)의 MIE는 앞에 있는 表 3.1에 이미 제시되어 있다.

粉塵 (Dust), 粉體 (Powder) 및 纖維 (Fiber) 등의 點火 Energy는 Gas나 蒸氣보다 10 ~ 100 배 이상으로 훨씬 높아 대개 2 ~ 5000 mJ의 범위에 있는 것으로 알려져 있다.

粉塵의 MIE는 化學的 成分외에 粒子의 크기에도 의존한다. 보통 粉塵의 粒子가 크면 點火 Energy도 커진다. Aluminium 粉塵의 最小 點火 Energy는 20 mJ, 木粉은 30 mJ, 小麥粉은 160 mJ 등이다.

두 가지 이상의 可燃性 物質이 섞여 있는 混合物의 경우, 각각의 물질의 濃度가 爆發 下限界 이하일지라도 爆發性을 가질 수 있다. 특히 混合物을 구

성하고 있는 物質들의 狀態가 다른 것을 異狀 混合物이라고 하는데, 이 경우 點火 Energy는 크게 낮아질 수 있다. 예를 들어 粉塵에 가스가 혼합되면, 혼합된 가스의 含量이 爆發 下限界보다 크게 낮더라도 爆發이 일어날 위험이 있다. 또한, 공기 중의 酸素 濃度가 증가할수록 點火 Energy는 감소하여 爆發 危險性이 커지게 된다.

3.1.4 可燃性 Gas의 點火 Energy에 影響을 주는 要素

容量性 불꽃放電은 誘導性 불꽃放電과 比較하여 電流값이 크고, 放電 持續 時間이 그리 짧은 특징을 갖고 靜電氣 放電과 같은 양상을 나타낸다. 이 때문에 容量性 불꽃放電에 의하여 구해진 點火 Energy는 그대로 靜電氣 放電에 의한 點火性和 결부시키는 것이 가능하다.

(1) 溫度 및 壓力

일반적으로 最小 點火 Energy는 溫度의 上昇에 따라 현저하게 감소한다. 표 3.2는 몇 가지 物質들의 點火 Energy의 溫度 變化를 나타내며, 이 수치들은 대체적으로 다음 式을 따른다.

$$E_{ig} = C e^{k T_0} \quad (3.3)$$

여기서 E_{ig} : 點火 Energy; T_0 : 可燃性 混合氣體의 初期 溫度;

C 및 k : 可燃性 物質에 따른 定數.

Propane-空氣의 混合氣體의 경우 MIE는 대략 絕對溫度의 2.8乘에 反比例하여 減少한다. Propane-空氣 混合氣體의 MIE에 대한 溫度의 影響은 그림 3.4에서 보여지는 바와 같다.

最小 點火 Energy의 壓力 依存性은 다음 식으로 나타내어진다.

표 3.2 점화 Energy의 온도 변화

可燃性 物質	溫度 [°C]	點火 Energy [mJ]
二黃化炭素	25	0.076
	100	0.05
Isooctane	25	2.7
	100	1.1
	171	0.48
Propane	-40	1.17
	-30	0.97
	-20	0.84
	25	0.55
	57	0.42
	82	0.36
	100	0.35
	204	0.14
酸化 Propylene	25	0.24
	100	0.15
	182	0.09

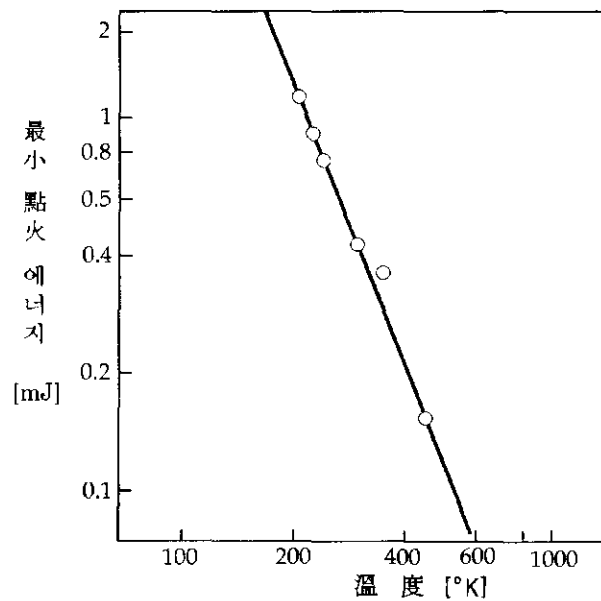


그림 3.4 Propane-空氣 混合氣體의 MIE에 대한 온도의 影響 (1 氣壓)

$$E_{ig} \cdot P^b = \text{一定} \quad (3.4)$$

여기서 P 는 壓力 (Power)이며, 그리고 대개의 경우, $b \cong 2$ 이다. Propane-空氣의 混合氣體의 경우는 $b \cong 1.5$ 이며, 따라서 MIE는 壓力의 1.5乘에 反比例하여 감소한다. 그림 3.5는 水素 空氣 混合氣體의 MIE에 대한 壓力의 影響을 나타내고, 그림 3.6은 Propane-空氣 混合氣體의 MIE에 대한 壓力의 影響을 나타낸다.

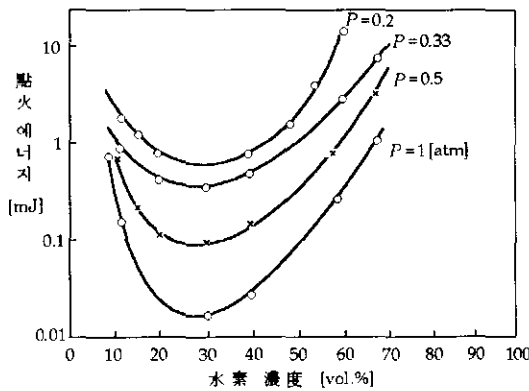


그림 3.5 水素-空氣 混合氣體의 MIE에 대한 壓力의 影響

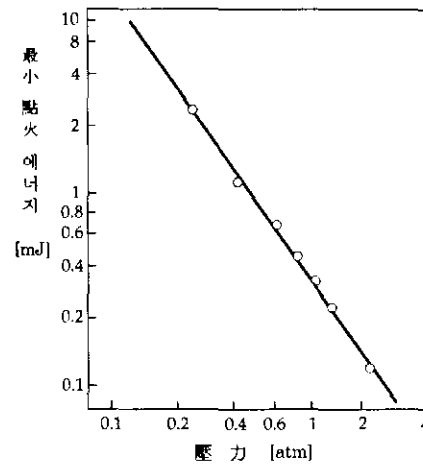


그림 3.6 Propane-空氣 混合氣體의 MIE에 대한 壓力의 影響

이 그림들에서 알 수 있는 바와 같이, 壓力이 低下하면 最小 點火 Energy는 增加하지만 아주 낮은 壓力에서는 點火가 일어나지 않게 된다. 이 때의 壓力을 最小 點火 壓力이라 부르는데, 이 最小點火壓力은 電極間隙, 燃燒容器의 크기 등 實驗 裝置에 크게 依存하므로 이를 決定하는 것은 거의 不可能하다. 最小 點火 Energy의 壓力 依存度를 實驗的으로 구하기 위해서는 電極間隙에 의한 消焰效果도 壓力에 의존하므로 電極間隙과 壓力을 變數로 하여 測定하여야 한다.

(2) 組成 및 添加物

點火 Energy는 可燃性 混合氣體의 濃度에 따라서 현저하게 變化하여, 化學量論比 근처에서 最少値를 갖고, 低濃度側과 高濃度側에서 無限大가 된다. 이는 可燃範圍의 上限界 및 下限界를 定하는 의미를 갖고 있다. 대개의 可燃性 物質에서는 最小 點火

Energy는 化學量論比 (Stoichiometric Ratio)보다 可燃性 物質이 약간 高濃度인 쪽에서 나타난다. 點火 Energy와 濃度の 關係가 특이한 모양을 갖는 Acetylene-空氣系에 대한 것이 그림 3.7에 나와 있다. 이 그림은 可燃範圍의 上限界가 存在하지 않음을 보여주고 있는데, 이는 충분히 높은 點火 Energy를 가하면 Acetylene 單一 Gas에 의한 分解爆發이 일어나기 때문이다.

可燃性 Gas에 酸素를 혼합하면 空氣가 혼합되어 있을 때보다 MIE가 현저히 감소한다.

可燃性 混合氣體에 不活性氣體를 첨가하면 爆發範圍가 좁아질 뿐만 아니라, 最小 點火

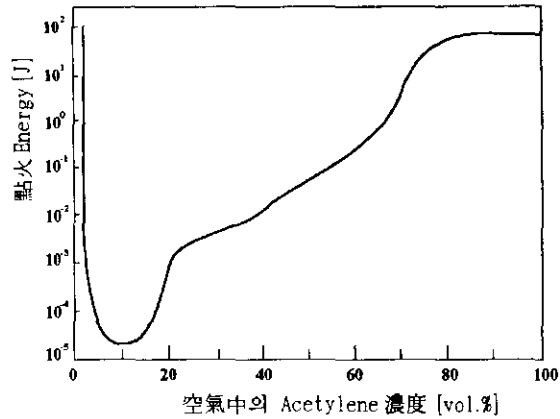


그림 3.7 Acetylene-空氣系의 點火 Energy

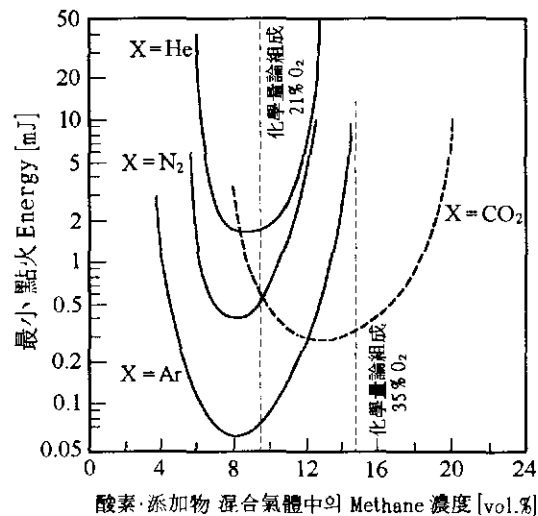


그림 3.8 Methane-酸素系의 最小 點火 Energy의 添加物에 의한 效果

Energy도 증가한다. 그림 3.8은 Methane-酸素系에 대한 不活性氣體의 添加效果를 나타내고 있다. 그 效果는 $\text{He} > \text{N}_2 > \text{Ar}$ 의 順序가 된다. 그 이유는 添加 物質의 比熱과 熱傳導率에 관계하기 때문이다. 二酸化炭素의 效果는 He 程度の 효과를 갖고 있으나 可燃性 物質에 따라 다를 수 있다.

(3) 기타 因子

點火 Energy의 大小는 可燃性 物質의 化學構造에 따라서도 다르다. 炭化水素의 點火 Energy의 경우 $\text{Alkane} > \text{Alkene} > \text{Alkyne}$ 의 順으로 감소한다. Chain의 길이, Branch 및 負(-) 置換基는 點火 Energy를 증가시키고, 共有結合은 이를 감소시킨다. 또한, 過酸化 結合은 點火 Energy를 감소시키고, Ester 및 Ketone 結合은 이를 증가시킨다.

可燃性 混合氣體가 流動하고 있을 경우에는 流動 速度가 클수록 點火 Energy가 커지게 되는데, 이는 流動할 때 熱損失이 있기 때문이다.

3.1.5 最小 點火 Energy의 測定方法

最小 點火 Energy는 電氣의 불꽃放電 Energy를 이용하는 방법이 精度도 높고 再現性이 좋아 일반적으로 많이 사용되고 있다.

그림 3.9는 測定法의 原理를 나타내고 있다. 靜電容量 C 인 Condenser에 서서히 充電하고, 그 兩端의 電壓이 불꽃放電 電極의 絶緣 破壞 電壓 V_1 에 달하면 放電이 일어나게 된다. 放電후의 電壓은 V_2 가 되는데, 이 때의 放電 Energy W 는 다음과 같이 주어진다.

$$W = \frac{1}{2} C (V_1^2 - V_2^2) \quad (3.5)$$

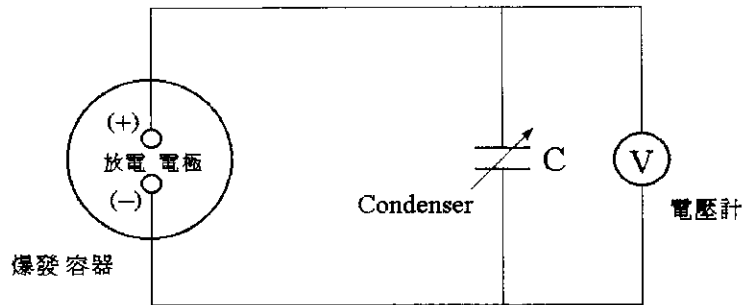


그림 3.9 最小點火 Energy의 測定法の 原理圖

點火의 有無에 의하여 最小點火 Energy $E_{\min}$ 이 결정된다. 이 때 측정되는 點火 Energy는 電極의 形狀 및 電極間隙에 의하여 영향을 받으므로 이 因子들을 변수로 하여 측정하여야 한다.

粉塵 爆發의 最小點火 Energy 測定方法은 可燃性 混合氣體의 경우와 원리는 同一하다. 그러나 粉塵을 均일하게 爆發容器內에 分散시키는 것이 어렵고, 最小點火 Energy가 氣體에 비하여 100 ~ 1000 배나 큰 것도 고려되어야 한다.

3.2 燃燒·爆發의 Mechanism

3.2.1 點火 爆發 Mechanism 理論

可燃性 混合物이 어떻게 發火되어 燃燒가 계속되는가에 대한 理論은 대체적으로 2가지로 摘要되어지고 있다. 하나는 복잡한 化學反應을 全反應 한가지로 표시하고 거기서 나오는 反應熱에 의하여 燃燒가 계속된다는 理論이며, 다른 하나는 化學反應을 개개의 要素反應 단계로 分解하여 생각하고 熱적으로 中性에서도 反應이 진행한다고 보는 理論이다.

(1) 熱爆發 理論^[4]

化學反應의 속도는 溫度의 상승에 의하여 매우 빠르게 증가되는 것이므로, 爆發이 일어나기 위한 條件은 反應系內에 대한 熱의 출입과 밀접한 관계가 있다. 化學反應에 의하여 발생되는 熱과 傳導, 對流 및 輻射에 의하여 손실되는 熱을 비교하여, 發生熱이 클 때에는 열에 축적에 의해 反應系의 온도가 점점 상승하여 爆發에 이르게 된다. 반면에 損失熱이 클 경우에는 反應系의 온도가 저하되어 爆發이 일어나지 않게 된다. 熱爆發 理論은 기본적으로 이상과 같은 생각에 기초하여 성립되고 있다.

Semenov에 의한 Model은 가장 단순하면서도 이 現象의 특징을 定性的으로 잘 설명하고 있다. 化學反應에 의하여 발생되는 熱量 Q_+ 는 다음과 같은 Arrhenius 式에 의하여 나타내어 질 수 있다.

$$Q_+ = Qf(n)Ae^{-\frac{E}{RT}} \quad (3.6)$$

여기서, $f(n)$ = 濃도에 관계되는 factor, $A \exp(-E/RT)$ = 反應速度定數, 그리고 Q = 反應熱 등이다.

反應系가 全 空間에 걸쳐 一定 溫度 T 라고 가정하고, 反應器의 器壁 溫度를 T_0 로 하면 反應器의 器壁으로부터 放散되어 빠져나가는 熱量 Q_- 는 다음 식과 같이 주어진다.

$$Q_- = k(T - T_0)S \quad (3.7)$$

여기서, k = 熱傳達 係數이고, S = 反應器의 表面積이다.

式 (3.6) 및 (3.7)로 각각 표현되고 있는 發生熱量 Q_+ 및 放散熱量 Q_- 의

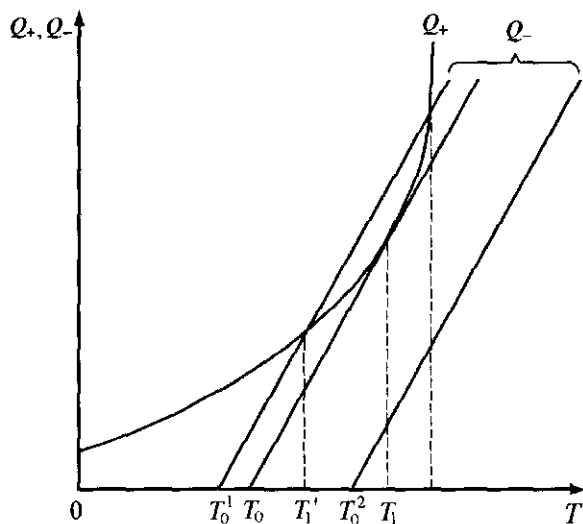


그림 3.10 發生熱量 Q_+ 및 放散熱量 Q_- 의
溫度 依存性

溫度 依存性을 그림으로 나타내면 그림 3.10과 같다.

Q_+ 는 曲線으로 나타나고, Q_- 는 T 軸 切片이 反應容器의 溫度인 T_0^1, T_0 및 T_0^2 에 따라 결정되는 直線이다 ($T_0^1 < T_0 < T_0^2$).

먼저 $T_0^1 < T_0$ 인 경우에는 초기에 發生熱量 Q_+ 가 放散熱量 Q_- 보다 크므로 反

應系의 溫度는 器壁의 溫度보다 높게 된다. 그 후 反應系의 溫度가 T_1' 보다 더 올라가게 되더라도 외부로 빠져나가는 放散量이 發熱量보다 많으므로 溫度는 T_1' 으로 다시 내려가 反應系는 爆發을 일으키지 않고 器壁의 溫度보다 약간 높은 T_1' 에서 平衡을 유지하게 된다.

$T_0^2 > T_0$ 인 경우에는 發生熱量 Q_+ 가 모든 溫度 範圍에서 Q_- 보다 크므로 反應系에 熱이 축적되어 溫度가 높아지게 되고, 이에 따라 反應速度는 더욱 빨라져서 爆發로 이어지게 된다 (自然爆發).

器壁의 溫度가 T_0 인 때에는 曲線 Q_+ 와 直線 Q_- 가 $T = T_1$ 에서 接하게 되어, 이 점으로부터 正常反應이 일어나는 경우와 爆發反應이 일어나는 경우의 限界條件을 구할 수 있다. 즉 $Q_+ = Q_-$ 및 $dQ_+/dT = dQ_-/dT$ 로부터 다음 式들을 얻을 수 있다.

$$k(T_1 - T_0)S = Q f(n) A e^{-\frac{E}{RT_1}} \quad (3.8)$$

$$kS = \frac{Q f(n) A E}{R T_1^2} e^{-\frac{E}{RT_1}} \quad (3.9)$$

위 식으로부터 T_1 을 소거하여 다음과 같은 近似式을 얻을 수 있다.

$$f(n) = \frac{kSRT_0^2}{EQA} e^{\frac{E}{RT_0}} = BT_0^2 e^{\frac{E}{RT_0}} \quad (3.10)$$

또는

$$\ln \left[\frac{f(n)}{T_0^2} \right] = \frac{E}{RT_0} + \ln B \quad (3.11)$$

여기서, 氣體反應의 경우 단순화하여 i 次 反應을 생각하면 $f(n)$ 을 p^i 로 나타내어질 수 있으므로 濃度限界는 다음과 같이 결정된다.

$$\ln \left[\frac{p^i}{T_0^2} \right] = \frac{E}{RT_0} + \ln B' \quad (3.12)$$

이 식은 爆發限界를 나타내는 壓力과 溫度의 관계를 나타내고 있으며, 대부분의 爆發이 이 式에 따른다고 생각할 수 있다.

지금까지 설명한 熱爆發 理論의 Semenov Model은 反應系 全體에 걸쳐서 균일한 溫度를 가정하고 있는데 특징이 있다. 그후 Frank-Kalmenetskii 理論에서는 反應系내에서의 溫度 分布를 고려하여 이 Model을 보완하였다. 그러나 여기서도 反應物의 消耗과 反應系내에서의 溫度分布에 의거한 活性化 Energy의 補正 등은 고려되고 있지 못하고 있으며, 최근 이러한 要素들을 고려한 개량된 理論들이 등장하고 있다.

(2) 連鎖分枝爆發 理論^[4]

連鎖分枝 反應은 反應系 내에서 反應性이 강한 化學物質이 自己 觸媒적으로 생성되고 그 결과가 爆發現象으로 感知되는 것이다. 이 때 일어나는 一連의 反應은 다음의 4 段階로 나누어 생각할 수 있다.

① 開始反應

連鎖의 活性中心 (Chain Carrier라고도 함.)을 생성하는 반응으로서, 安定된 分子에서 吸熱 分解反應 등에 의해 自由電子와 Free Radical이 만들어져 나오는 극히 완만한 반응이다.

② 成長反應

開始反應에서 생성된 活性種이 최초의 反應物分子와 반응하고 活性中心이 생성되던가 또는 제2의 活性種이 생성되어 나와 連鎖가 傳播, 진행되는 과정이다.

③ 分枝反應

하나의 活性種이 반응하여 2 가지 이상의 活性種이 생성되어 活性種의 수가 늘어나는 반응이다. 이 반응이 爆發의 樣相을 상징하는 것이 된다.

④ 停止反應

連鎖反應의 종료를 의미하는 反應으로서, 2 가지의 Free Radical에 의한 再結合이 Free Radical과 分子의 반응에 의하여 安定된 分子 또는 不活性인

Free Radical을 생성한다. 이 과정의 要素反應은 보통 發熱反應이다.

水素, 炭化水素類, 燐, 硫黃, 黃化水素, 磷化水素, 二黃化炭素, 一酸化炭素, 암모니아 등 대개의 可燃性物質의 燃燒反應은 대체적으로 위와 같은 反應過程에 의하여 그 Mechanism이 설명된다. 그러나 복잡한 分子에 대해서는 개개의 要素反應 Mechanism이 완전하게 설명되지 못하고 있다.

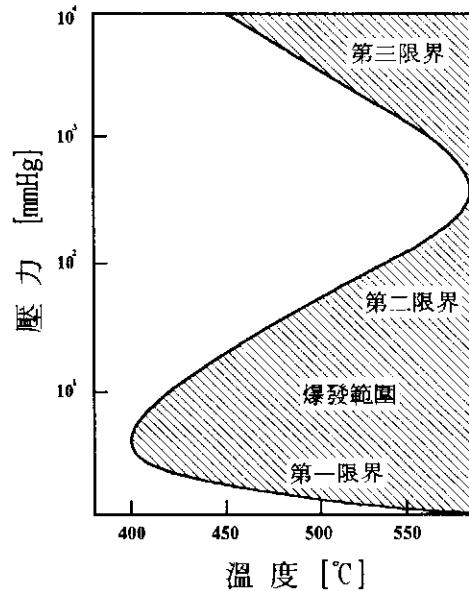
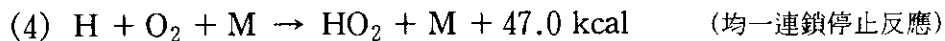
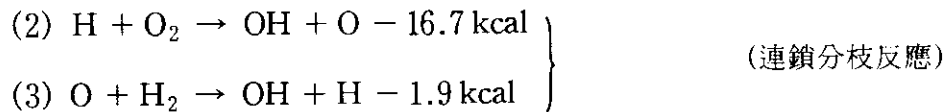
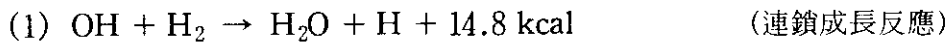
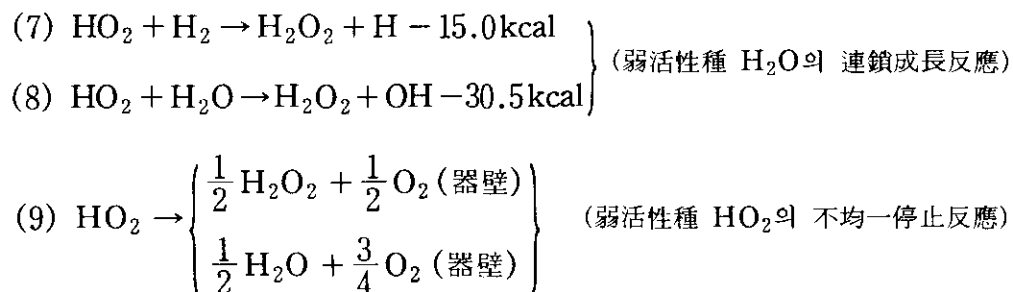


그림 3.11 混合氣體의 爆發範圍

여기서는 한 例로 水素爆發에 대해서 連鎖分枝 爆發理論에 의하여 설명하고자 한다. 水素와 酸素의 混合氣體에 대해서는 그림 3.11에 나타나 있는 바와 같이 제1한계, 제2한계, 및 제3한계가 존재한다. 이는 다음과 같은 要素反應으로 설명될 수 있다.





第一限界는 反應容器 表面의 性質에 影響을 받기 쉽고, 용기의 크기가 커지거나 不活性氣體가 混入되면 低壓側으로 이동한다. 따라서, 이 限界는 反應 (1), (2) 및 (3)에 의한 連鎖 分枝反應과 反應 (5) 및 (6)에 의한 反應容器 器壁에서 일어나는 不均一連鎖 停止反應이 같게 된 경우에 발생한다. 第二限界는 溫度 및 壓力의 依存性이 강하고, 壓力이 커지면 爆發이 抑制된다. 이는 連鎖反應 (1), (2) 및 (3)과 競爭하고, 壓力 依存性이 큰 3分子 反應 (4)에 의한 均一 連鎖 停止反應이 일어나고 있기 때문이다. 第3限界는 熱爆發과 連鎖爆發 중 어느 것이 主가 되어 일어나고 있는지 아직 확실하지 않은 한계이다. 어떤 조건 아래에서는 連鎖停止反應 (4)에 의하여 생성된 活性이 약한 Free Radical HO_2 가 反應 (7) 및 (8)에 의하여 連鎖를 계속하던가 器壁으로 擴散하여 反應 (9)에 의하여 消滅하든가 하여 均衡을 이루고 있다고도 생각할 수 있다.

3.2.2 點火 爆發의 成長過程

爆發은 燃燒의 한 形態로서, 化學變化에 의하여 일어나는 壓力의 急激한 上昇 現象을 말하며, 이 爆發의 結果로서 주변의 조건에 따라 爆鳴, 高熱, 發光, 破裂, 破壞 등을 同伴한다. 이러한 爆發은 보통 그림 3.12와 같은 過程을 거쳐 일어난다.

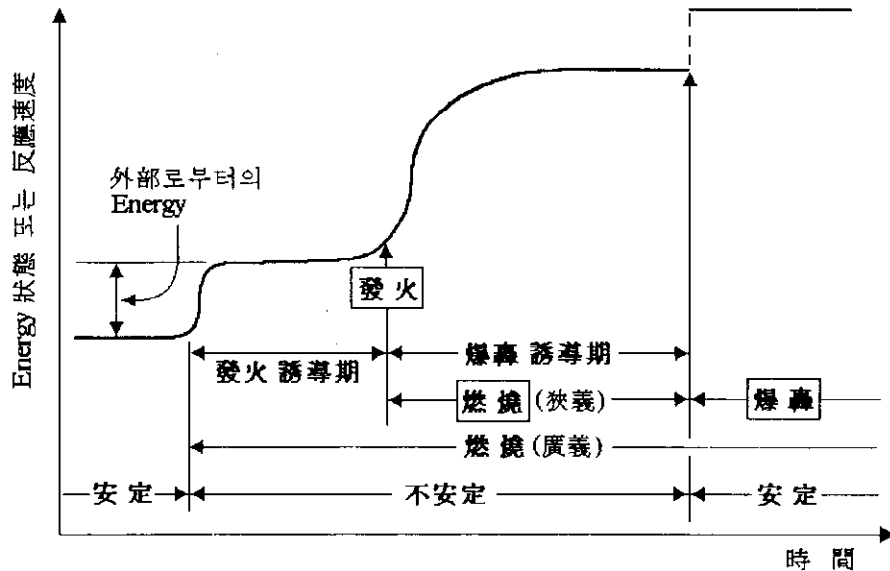


그림 3.12 可燃性 物質의 爆發 進行 過程

燃料과 酸化劑가 혼합된 可燃性 混合物은 外部에서 熱, 放電, 火焰 등의 Energy가 주어지면 일반적으로 化學反應이 시작되고, 反應에 의해서 생성된 熱과 외부에 放出되는 熱이 平衡을 이루는 定常狀態, 즉 緩慢 燃焼 狀態가 된다. 外部에서 주어지는 Energy가 크게 되거나 反應系의 온도가 올라가면 化學反應은 溫度 依存性이 指數的이므로 급격히 加速되어 可燃性 混合物은 發火에 도달하게 된다. 이 때의 狀態를 發火 또는 點火 (Ignition)라고도 부르며, 發火에 이르기까지의 시간을 發火 遲滯時間 (Time Lag), 發火 待機時間, 또는 發火 誘導期間 등으로 부른다. 反應容器가 작고 可燃性 混合物의 양이 적은 경우에는 燃焼는 보통 여기서 종료되어 버린다.

그러나 可燃性 混合物로 가득 채워진 Pipe의 한 끝 또는 反應系의 일부에서 發火가 발생하면 燃焼는 燃焼波 또는 火焰으로서 媒體중을 傳播하여 나간다. 이 過程은 좁은 의미의 燃焼이고 爆燃이라고 부른다. 이 狀態는 不安定하고 反應速度는 서서히 加速된다. 그리고 이 燃焼波의 傳播는 갑자기 爆發

(Detonation)波로 移行한다. 이 遷移는 不連續으로서 爆發波의 傳播速度가 未燃燒 部分의 音速보다 큰 경우가 爆發이다. 高速의 燃燒反應인 爆發은 衝擊波를 同伴하며 이 衝擊波는 反應帶에서 생기는 Energy에 의하여 維持된다. 爆發過程은 安定된 狀態이다.

이와 같이, 可燃性 混合物의 爆發 成長過程은 發火에서 시작하여 緩慢 燃燒狀態를 거쳐 爆發로 이어지는 것이다. 이 전체 過程을 넓은 의미의 燃燒라고도 한다. 때에 따라서 可燃性 混合物의 量이 적을 때나 外的 條件이 다를 때는 이 燃燒過程이 最終 段階까지 移行되지 않고 도중의 過程을 持續하거나 그대로 끝나 버리는 경우도 있다.

위의 燃燒過程은 Burner의 燃燒, 油面상의 火焰, Rocket 推進燃料의 燃燒, 火藥類의 爆發, Engine Cylinder내의 爆發, 都市 Gas의 爆發 事故에 이르기까지 다양한 형태로 나타나고 있다. 이것은 또한 氣體 狀態에만 한정된 것이 아니라 固體 및 液體 狀態 또는 混合된 狀態에서도 일어날 수 있다. 爆發의 現象은 化學過程과 擴散, 熱傳達, 物質移動 등 物理現象이 서로 관계하고 있어 매우 복잡하다.

3.2.3 高速 燃燒의 形態

燃燒는 多様な 速度로 일어난다. 양초가 타는 것과 같은 定常狀態 (Steady-State)의 燃燒는 速度가 매우 느려서 觀察하기도 쉽고 壓力의 上昇은 거의 야기하지 않는다. 可燃性 物質과 酸素의 混合比가 點火範圍 (Ignition Range)에 있게 되면 燃燒速度는 增加한다. 燃燒의 速度가 빨라지면 불꽃 속에서 일어나는 화학변화는 定常 狀態를 유지하지 못하고 거친 攪亂 狀態가 된다.

대개의 燃燒現象은 燃燒波의 傳播形態로 나타나므로 이 燃燒波의 傳播速

度에 따라 燃燒의 종류를 구분하면 다음과 같다.

(1) 爆燃 (Deflagration)

爆燃 (Deflagration)의 경우에는 氣體 燃燒波의 速度는 보통 수십 내지 수백 cm/s 정도의 비교적 低速이다. 이 爆燃은 약간의 壓力上昇과 약간의 雜音效果를 유발한다. 爆發點의 上限과 下限 근처 溫度에 있는 混合物은 보통 爆燃의 형태로 燃燒한다.

(2) 爆發 (Explosion)

爆發 (Explosion)의 경우에는 氣體 燃燒波의 傳播速度는 보통 m/s Order이며, 전체적인 燃燒過程이 不安定하게 일어나며 3 ~ 10 bar의 상당한 壓力上昇을 유발한다. 高溫에 기인한 氣體의 갑작스런 膨脹으로부터 高音의 雜音이 현저하게 생겨난다. 이 爆發의 例로는 휘발유의 蒸氣와 空氣의 混合物의 燃燒를 들 수 있으며, 이의 燃燒速度는 20 ~ 25 m/s이다.

(3) 爆轟 (Detonation)

爆轟 (Detonation)의 경우에는 氣體 燃燒波의 傳播速度는 보통 수 km/s 정도의 高速이다. 이 爆轟이 일어나면 순간적으로 爆發物質이 分解되며 20 bar 이상의 壓力上昇이 일어난다. 이 때 발생하는 轟音 또한 날카롭고 매우 크다.

4. 測定 實驗 裝置의 構成 및 設置

可燃性 混合氣體의 點火 Energy를 測定하기 위해서는 임의의 高電壓을 발생시켜 이를 일정한 條件下의 可燃性 混合氣體가 들어 있는 密閉된 容器內에서 放電시켜 點火 爆發 有無를 확인하고 이 때의 主要 狀況을 기록하는 裝置가 필요하다. 이 章에서는 이번 研究에서 考案하여 製作 設置한 韓國産業 安全公團 産業安全研究院 (이하 “本 研究院”이라고 한다.)의 點火 Energy 測定實驗裝置에 대해서 記述하고자 한다.

4.1 點火 Energy 測定 實驗 裝置의 構成

點火 Energy 測定實驗裝置의 全體的인 概念圖는 그림 4.1과 같으며, 主要 構成 要素는 다음과 같다.

- 高電壓 直流電源 供給器 (High Voltage DC Power Supply)
- Condenser Box
- 高電壓 Relay
- 爆發桶 (Explosion Chamber)
- 眞空펌프 (Vacuum Pump)
- Digital Oscilloscope 및 靜電電壓計 (Electrostatic Voltmeter)
- 高電壓 인가 電極 (Electrodes; Point Tip)
- 空氣 壓縮機 (Air Compressor)
- Gas 貯藏桶 (Bombés)
- Data 處理 System

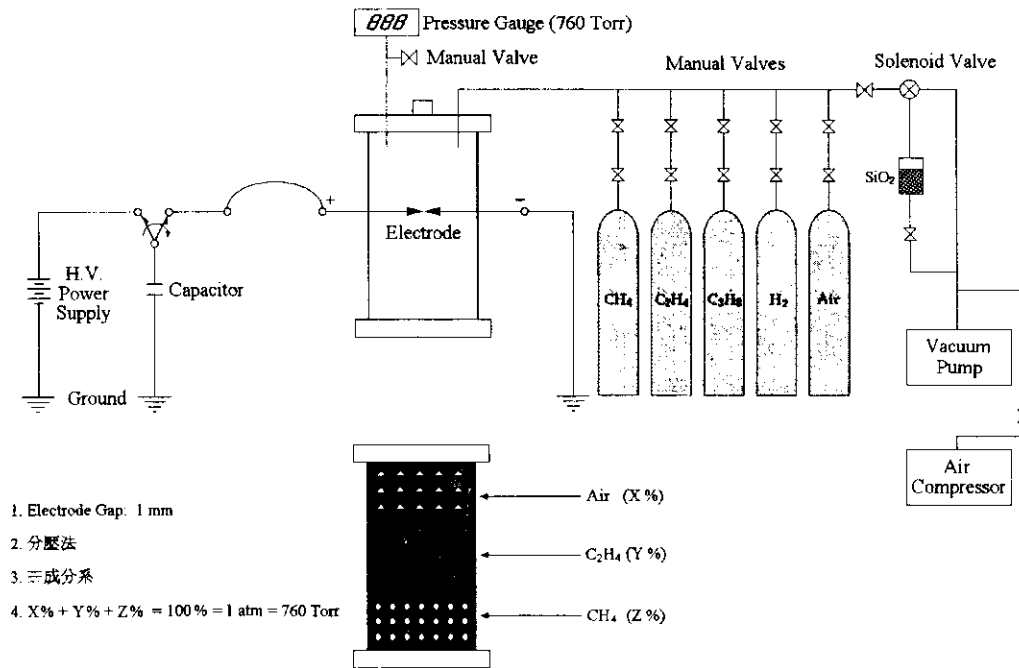


그림 4.1 點火에너지 測定 實驗 裝置의 概念圖

點火 Energy 測定 實驗裝置중 電氣 시스템은 그림 4.2와 같으며, 配線 및 接續時 주의사항은 아래와 같다.

- 配線은 시스템에 걸맞도록 30 kV로 한다.
- Condenser와 接續되는 모든 부분은 Sealing, Coating 처리하여 高電壓의 漏泄이 없도록 한다.
- 시스템 전체는 接地를 반드시 실시하여 電源系統과 等電位시킨다.
- 10 ~ 30 pF의 低容量 Condenser의 경우는 Stray Capacitance 및 Inductance 문제가 있다. 그러므로 配線은 가능한 한 짧게 하여야 하며, 이보다도 더 작은 Condenser의 경우는 裸線을 사용하는 것이 좋다.

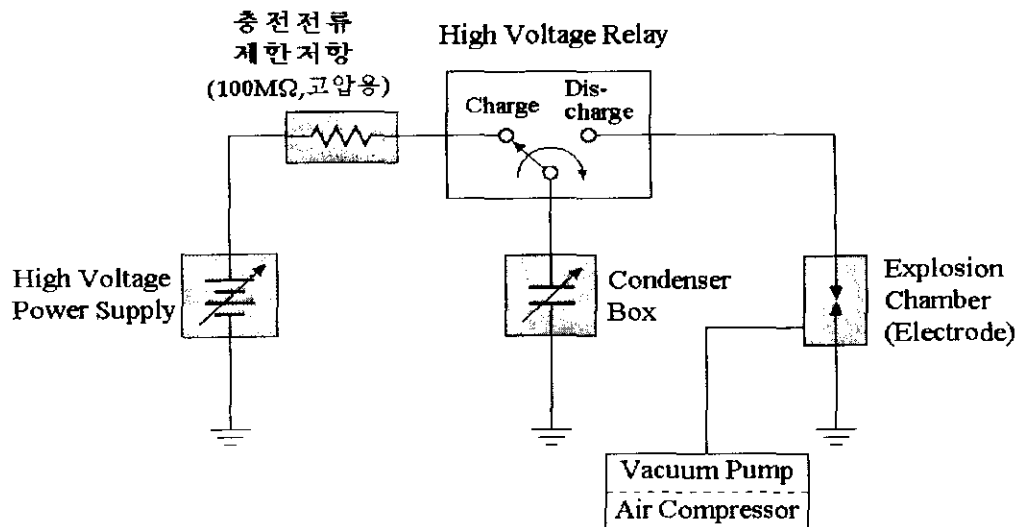


그림 4.2 點火에너지 測定裝置의 電氣 시스템 構成圖

本 研究院 실험실에 설치된 點火 Energy 測定 實驗 System 全體의 外形 寫眞은 그림 4.3과 같다.

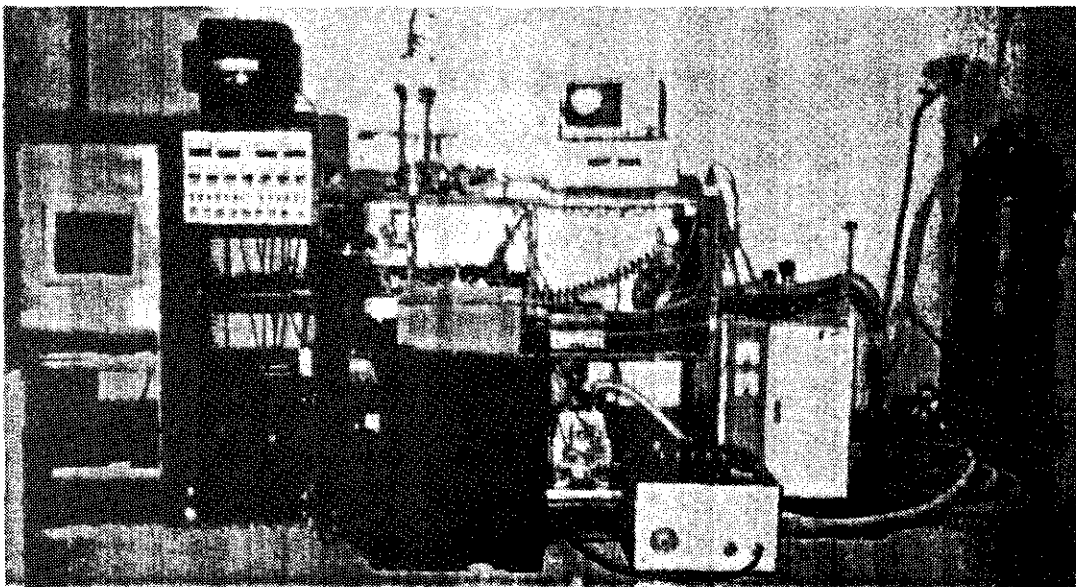


그림 4.3 點火 Energy 測定 實驗 裝置의 全體 外形 寫眞

4.2 測定 實驗 裝置의 主要 部分別 仕様

測定 實驗 裝置의 主要 部分別로 사양 및 주의할 사항을 열거하면 다음과 같다. 아울러 本 研究院 실험실에 설치한 實驗裝置의 特徵을 外形 寫眞과 함께 소개코자 한다.

(1) 高電壓 直流電源 供給器 (H.V. DC Power Supply)

靜電氣의 帶電 상태를 Condenser에 模擬的으로 만들기 위하여 Condenser의 高電位의 直流 電壓을 공급하기 위한 電源이다.

- 出力 電壓: $\pm 0 \sim 30$ kV (正·負 兩極性이 있으면 더욱 좋다.)
- Digital Indicator 형으로 Variable Control이 가능해야 한다. (각 Step별 指示 範圍: Min. 100V)
- 電流는 최대 2mA이나 클수록 좋다.
- 正·負 極性이 요구되는 것은 그림 4.4와 같이 하면 된다.

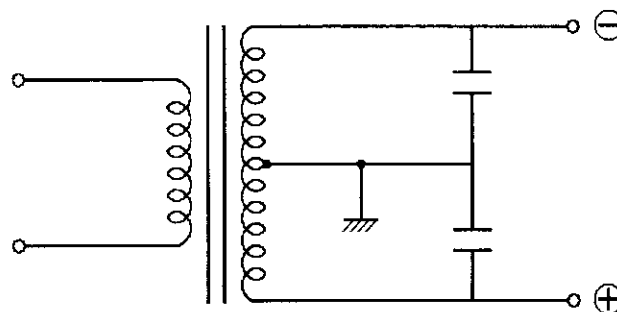


그림 4.4 兩極性 電源의 配線圖

그림 4.5는 本 研究院 실험실에 설치된 電源 供給 裝置의 外形 寫眞이며

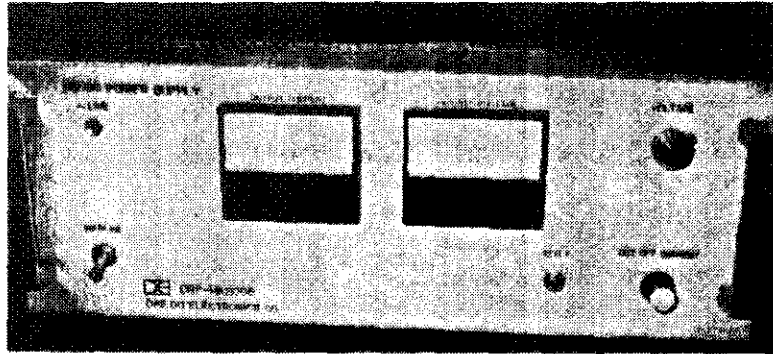


그림 4.5 DC Power Supply

그 사양은 다음과 같다.

- 出力 電壓: $\pm 0 \sim 30$ kV
- 出力 電流: $0 \sim 2.5$ mA
- 入力 電壓: 1ϕ , AC 110 V
- 製作社: 대도전자 (Dae-Do Electronics Co.; Model DRP-HK 2005)

(2) Condenser 箱子 (Capacitor Box)

靜電氣를 蓄積하는 각종 容量의 Condenser로 구성된 Box로서 高電壓 轉換 Switch를 內裝하고 있다.

- 耐電壓은 30 kV 이상이 좋다.
- Condenser의 容量은 수 pF에서 수천 pF까지 다양하게 구비하는 것이 좋다. 수천 pF 以上の 大容量 Condenser들은 粉塵 點火 實驗用으로 구비하여야 한다.
- 일본의 경우 Toshiba 등에서 高壓用 Condenser를 제작하고 있으나, 소량은 수주 주문이 곤란하여 주로 미국의 제품을 이용하고 있다.
- 才質은 Ceramic 재질이 좋다.

- 高壓 Condenser는 직류용이라도 極性은 관계 없다.
- Stray Capacitance 및 Inductance를 줄이는 기술이 緊要하다.
- Condenser의 자체 漏泄 時間이 길면 길수록 좋다.
- 絶緣抵抗은 10 G Ω 以上이어야 한다.
- 다량의 Condenser를 直·竝列 연결시 負(-)의 極性은 銅版에 共通 接地시켜야 한다.

그림 4.6은 本 研究院 實驗室에 설치된 Condenser Box의 外形 寫眞이며, 그 사양은 다음과 같다.

- 耐電壓: 30 kV
- 容量: 10, 12, 33, 50, 100, 300, 500, 1000, 2000 pF
- 絶緣抵抗: 10 G Ω 以上
- 方式: 直·竝列 接續 可能
- Selector 스위치: 耐電壓 30 kV, SF₆ 封入 또는 眞空 스위치

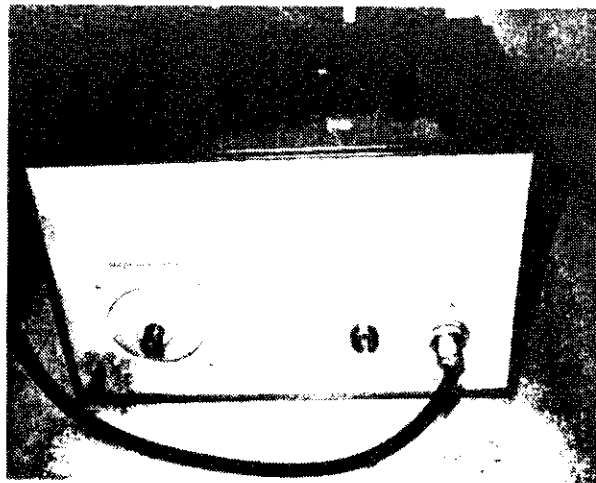


그림 4.6 Condenser Box

(3) 高電壓 Relay

Capacitor를 充電과 放電 상태로 轉換시켜 주는 高電壓 轉換 스위치이다. 외부에 接續 端子가 있는 것보다 密封된 것이 바람직하다.



그림 4.7 高電壓用 Relay

그림 4.7은 本 研究院 實驗室에서 사용하고 있는 高壓用 Relay의 外形 寫眞이다.

Relay의 특성상 半導體 素子로 만들어진 것이 더 좋으며, 향후 이의 상용을 고려하여야 한다.

(4) 放電 電極 (Electrode)

放電 電極의 주요 사양은 다음과 같다.

- 電極 種類에는 針狀 (Needle Point) Tip, 球狀 (Spherical) Tip, 棒狀 (Rod) Tip 電極들이 있다.
- 電極 間隙은 針狀 電極의 경우 1 mm가 적합하다.
- Needle 끝이 뾰족할수록 낮은 Energy에서도 放電이 쉽게 일어나므로 날카로운 針狀 電極은 Corona 放電에 적합하다.

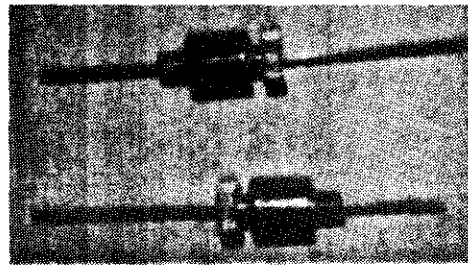


그림 4.8 放電 電極 (Electrode)

그림 4.8은 本 研究院 實驗室에서 사용하고 있는 針狀 放電電極의 寫眞이다.

(5) 電流 制限 抵抗 (Current Limit Resistor)

充電回路에 過度한 電流가 흐르는 것을 방지하기 위하여 電流制限用 抵抗을 사용하여야 한다. 이에 적합한 抵抗으로는 Ceramic 抵抗이나 金屬皮膜 抵抗이 좋다. 捲線 抵抗은 Stray Inductance 때문에 Condenser 充電用으로는 가능하나 放電回路에는 측정 데이터에 오류를 가져오므로 放電用에는 절대

사용해서는 안된다. 경우에 따라 無誘導 抵抗 (Non-Inductive Resistor)를 사용하여야 한다.

- 時定數: $\tau = RC$ [sec]
- 容量: 200 M Ω , 300 M Ω

(6) 點火 爆發桶 (Explosion Chamber)

可燃性 가스 또는 粉塵을 送入하여 靜電氣 放電을 일으켜 點火를 유발시키는 容器로서 爆發 현상을 肉眼으로 觀測할 수 있어야 한다.

- Gas用은 製作基準이 특별하게 정해진 것은 없으나 粉塵用은 IEC 規格을 따라 製作한다.
- 통 전체가 透明하거나 觀測窓이 있어 관측이 가능하여야 한다.
- 粉塵의 爆發下限界 濃度を 측정하는 국제표준 용기로는 Hartman式 Chamber와 Gravity式 Chamber가 있는데, Hartman式이 많이 사용되고 있다.

그림 4.9는 本 研究院 실험실에 설치된 點火 爆發桶의 外形 사진이다.

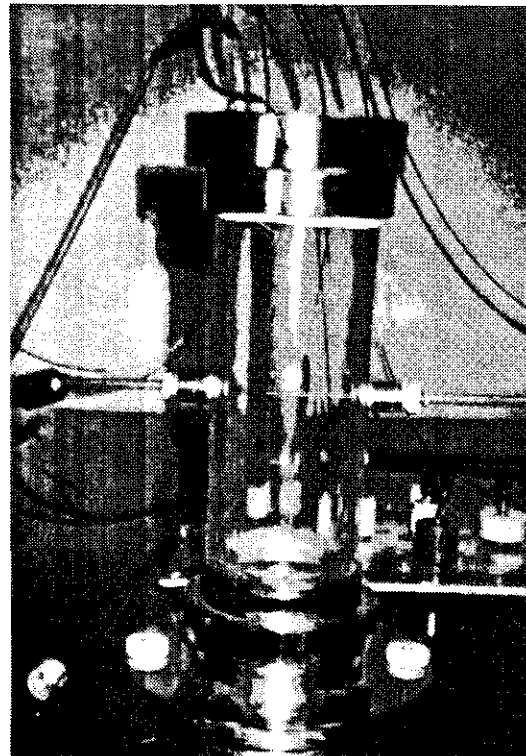


그림 4.9 點火 爆發桶

(7) 眞空 펌프 (Vacuum Pump)

爆發試驗 容器내에 들어 있는 殘留 Gas나 燃燒 Gas를 排氣시키기 위하여 사용하는 空氣 排出裝置이다.

本 研究院 實驗室에는 그림 4.10의 外形 寫眞으로 보여지고 있는 것과 같은 眞空 Pump가 설치되어 있으며, 그 사양은 다음과 같다.

- Oil式型, 배인 2단형
- 용량: 180 l/min
- 출력: 1/2 HP
- 到達 眞空度: 5×10^{-4} Torr

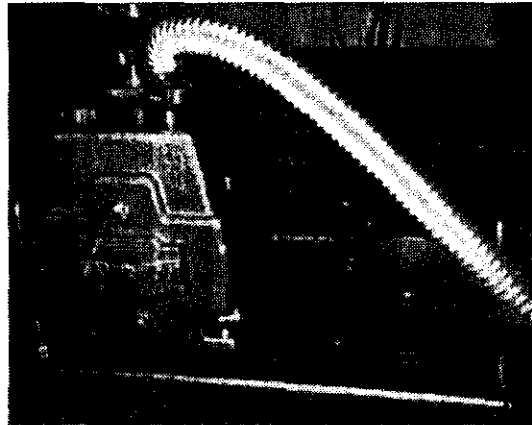


그림 4.10 眞空 Pump

(8) 空氣 壓縮機 (Air Compressor)

爆發實驗 容器內的 粉塵을 空氣에 의해 浮游 시키기 위하여 사용하는 空氣 供給裝置로서 이번 實驗에는 사용되지 않았으나 粉塵의 點火 Energy 測定 實驗에는 必須的인 裝備이다.

本 研究院 實驗室에 설치된 空氣 壓縮機 (그림 4.11)의 사양은 다음과 같다.

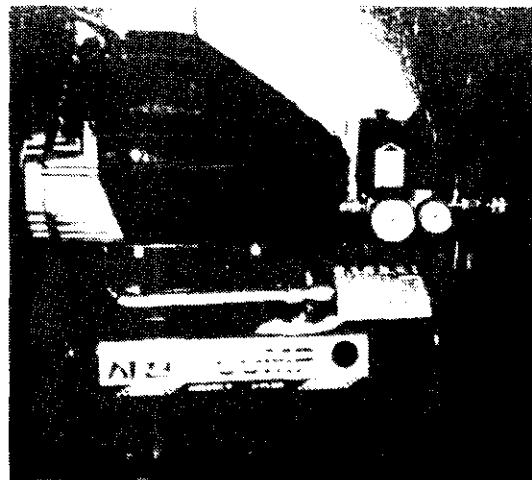


그림 4.11 空氣 壓縮機

- 出力: 1 HP
- 容量: 138 ℓ /min
- 壓力: 7.5 ~ 10 kgf/cm²
- Air Cleaner: 2 m³/min, 10 kgf/cm²

(9) 制御盤 (Sequence Controller)

可燃性 混合物 및 空氣의 送給 또는 排氣, 靜電氣 放電 등의 順次 (Sequence)를 制御하는 裝置이다.

- 0.1초 간격으로 時間 設定이 가능한 Relay 구동용 제어기
- Solenoid Valve 및 高壓 放電 時間 조절 가능

本 研究院 實驗室에 설치된 制御盤의 外形 寫眞은 그림 4.12와 같으며, 그 주요 特徵은 다음과 같다.

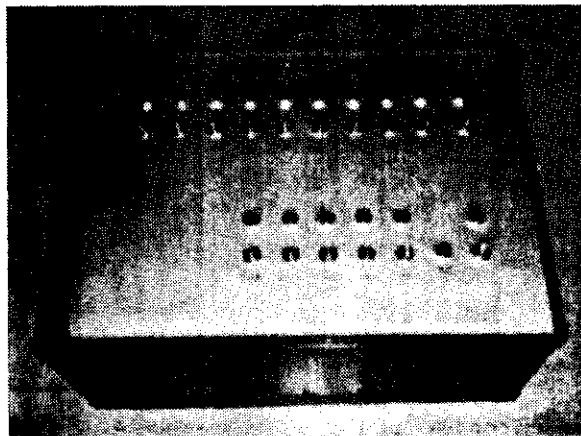


그림 4.12 制御盤 (Controller)

- AC, DC의 電壓 및 電流를 지시한다.
- Main Switch를 On, Off시킴으로서 각종 附屬裝置 및 計測器의 電源을 局部的으로 선택할 수 있도록 중앙으로 집중 배치하였다.
- 高壓 Condenser는 容量과 耐電壓을 위하여 直·並列로 선택하여 실험에 사용할 수 있도록 制御盤에 스위치를 달아 遠隔 조정되도록 하였다.
(高壓 Relay 구동용 電源: DC 24V)

- 일련의 Gas (또는 粉塵) 供給, 充電, 放電 및 排氣 등의 順次를 手動 또는 自動으로 制御할 수 있다.
- 각 Timer는 원하는 시간과 0.1초 간격으로 Setting할 수 있으며 아울러 Setting 값을 지시하는 기능도 갖추고 있다.
- 主 入力 (Main Input) 電源은 單相 220V이다.

(10) 데이터 處理 시스템 (Data Processing System)

放電電壓, 爆發壓力 및 압력 상승 속도, 溫度 등을 측정하여 기록하는 장치이다. 本 研究院 실험실에 설치된 데이터 處理 시스템의 構成圖는 그림 4.13과 같으며, 주요 附屬裝置 및 그 사양은 다음과 같다.

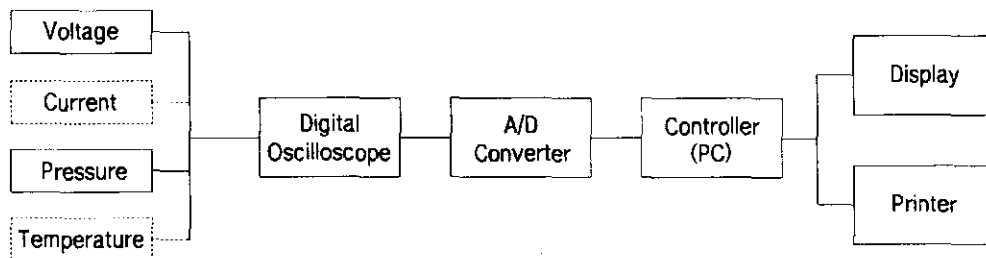


그림 4.13 Data 處理 시스템의 Block 線圖

- D/A, A/D Converter
 - Lecroy社 製品인 Digital Storage Oscilloscope (Model 9354TM)과 Interface 可能
- Digital Storage Oscilloscope
 - Lecroy社 製 Model 9354TM
 - Bandwidth: 500 MHz

- Digitizing Rate: Upto 2 Gigasamples/s

- 개인용 컴퓨터 (PC) 및
Data Acquisition System
(그림 4.14)

- DSP 機能 內裝
- 16M RAM, 1.2G HDD
- Data Processing: 90
MHz
- FDD, Monitor 및
Printer 포함

- 高速 溫度 測定裝置
- General Purpose
Interface Board IEEE
488 內裝
- Channel 數: 最大 32
- Acquisition 速度: 960
ch/s

- Scanning Model
선택기능, Alarm,
Digital I/O, Interface 支援, 모니터링 및 기본 프로그램 支援 可能

- Piezo-Type Sensor 및 Amplifier
- 測定壓力 範圍: 0 ~ 50 kgf/cm²

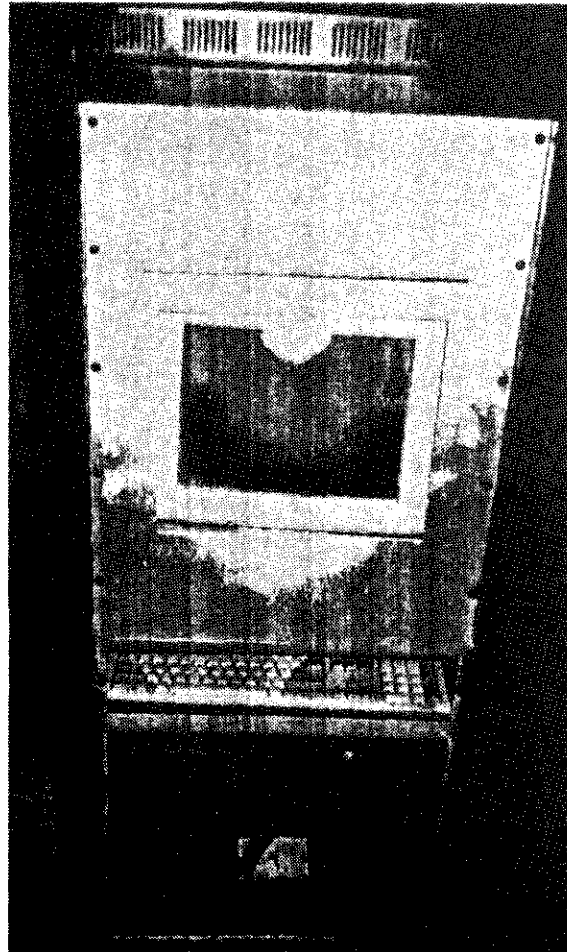


그림 4.14 Dara 處理 시스템을 위한
개인용 컴퓨터 (PC)

(11) 기타 裝置 및 部品

기타 計器類나 附屬裝置 및 附屬品으로 다음과 같은 것들이 있다.

- 靜電電壓 測定器 1대 (그림 4.15)
- 裝置支持臺 1조
- Hydraulic Cylinder (Hydraulic Center Hole Ram) 2개
- Torque Wrench 1개
- Thermocouple (C.A.) 50m

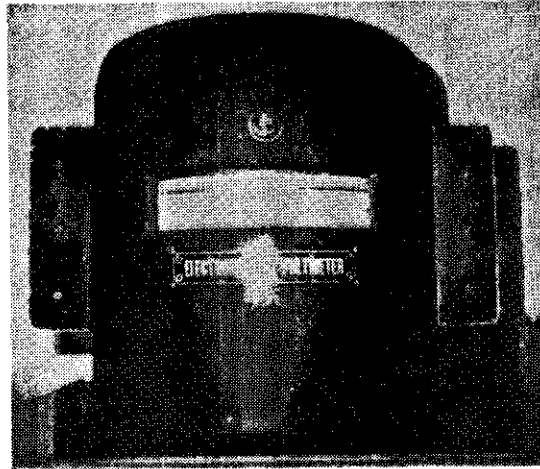


그림 4.15 靜電電壓 測定器

5. 實驗 方法 및 實驗 結果 分析

可燃性 物質의 靜電氣에 의한 最小 點火 Energy 測定을 위하여 우선 Ethylene 가스, Methane 가스, Propane 가스, 水素 가스를 2가지씩 空氣와 混合하여 사용하였다. 이 가스들은 防爆性能 檢定에 사용되는 것들로서 主要 特性은 3章의 표 3.1에 나와 있는 바와 같다.

最小 點火 Energy에 影響을 주는 要因은 放電電極의 크기 및 形態, 靜電 容量, 混合氣體의 壓力 및 分散速度, 周圍의 溫度 및 濕度, 그리고 混合氣體 中の 각 成分의 濃度 등이 있다. 본 實驗에서는 이중에서 混合氣體를 구성하고 있는 Gas의 濃度 變化가 點火 Energy에 미치는 影響에 대해서만 실험을 통하여 측정한 후 몇 가지 混合氣體의 最小 點火 Energy를 구하였다.

5.1 實驗 方法

가. 實驗裝置 設置 및 點火 Energy 算定 方法

實驗裝置는 제4장에서 설명한 대로 설치하여 사용하였다. 點火 Energy는 放電電壓뿐만 아니라 Condenser의 容量을 함수로 한 數式으로부터 구하여 산출하기 때문에 實驗에 사용하는 Condenser의 容量과 配線 Line의 Capacitance를 정확하게 측정하는 일이 무엇보다도 중요하다. 그림 5.1은 放電回路와 관련된 Capacitance를 나타내고 있으며, 표 5.1은 이 Capacitance 값들이다.

放電電極에서 발생하는 放電電壓 V 는 放電이 일어날 때의 絶緣破壞 (Breakdown) 電壓 V_1 에서 放電후의 電壓 V_2 를 뺀 값이 된다.

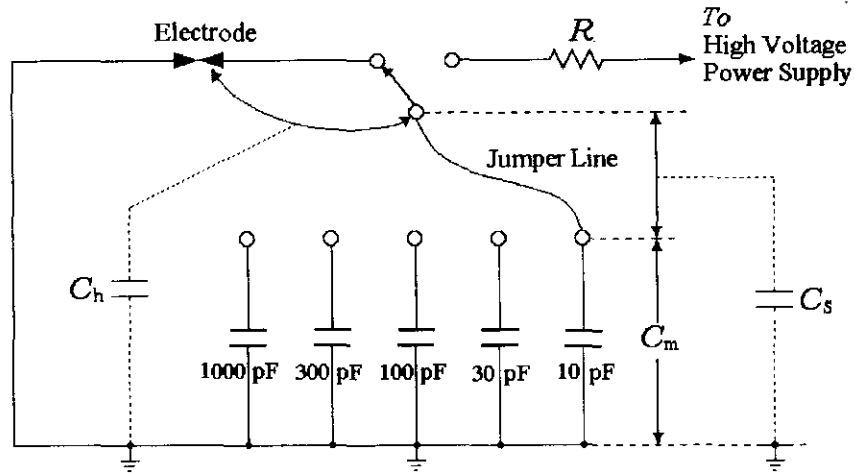


그림 5.1 Capacitance 測定 回路

표 5.1 콘덴서의 實際容量 및 放電回路의 Stray Capacitance 값 (單位: pF)

콘덴서의 표시 容量	구 분	콘덴서의 실제 容量 $C_m = C_1$	放電回路의 Stray Capacitance $C_s + C_h = C_2$	$\frac{C_1^2}{C_1 + C_2}$
10		13.9	7.8	8.9
33		34.4	13.2	24.86
50		60.0	12.8	49.45
300		350.7	-	350.7
500		419.5	-	419.5
1000		1586.9	-	1586.9
2000		2752.2	-	2752.2

放電후의 잔류 電壓 V_2 는 放電回路의 Stray Capacitance에 의한 것으로서
放電 初期 電壓 V_1 과 C_1 및 C_2 에 의하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_2 = \frac{C_2}{C_1 + C_2} V_1 \quad (5.1)$$

따라서, 放電 Energy는 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$E = \frac{1}{2} C V^2 = \frac{1}{2} (C_1 + C_2) (V_1 - V_2)^2 = \frac{1}{2} \frac{C_1^2}{C_1 + C_2} V_1^2 \quad [\text{J}] \quad (5.2)$$

여기서, E = 放電 Energy [J]; C = 放電回路의 Capacitance [F];

V = 放電電壓 [V]; C_1 = 充電回路의 Capacitance [F];

C_2 = 放電回路의 Stray Capacitance [F];

V_1 = 絶緣破壞 (Breakdown) 電壓 [V]; V_2 = 放電 후의 電壓 [V]

Condenser의 漏泄電流는 最小 點火 Energy 測定時 영향을 미치므로 다음 그림 5.2와 같은 試驗回路에 의해 확인하여 Condenser 자체로부터의 漏泄電流를 적극 억제하여야 한다. 漏泄電流를 확인하기 위하여 본 실험에서 측정 한 Condenser 充電量의 半減期 時間은 표 5.2와 같다.

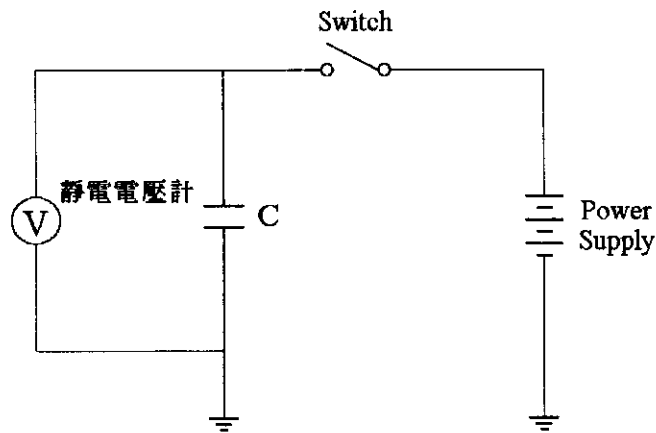


그림 5.2 Condenser 漏泄電流 試驗 回路圖

半減期 시간이 짧은 경우 (즉 Condenser의 표면 漏泄電流가 큰 경우)는 마른 천을 이용하여 Condenser 표면을 닦아 내고 乾燥시키는 등의 조치가 필요하며, Condenser가 劣化되었거나 不良인 경우는 交替한다. 아울러 接續

部 材料의 劣化 등의 경우를 대비하여 耐電壓이 큰 絶緣材의 사용 및 고무 테이핑을 하는 등의 조치와 維持 管理가 필요하다.

표 5.2 Condenser의 漏泄電流 試驗을 위한 半減期 측정값

Condenser [pF]	半減期	備 考
10	40 초	不良
30	1분 이상	良好
100	"	"
300	"	"
1000	"	"

放電電極 間격이 可燃性 混合氣體의 最小 點火 Energy에 미치는 영향은 1 ~ 4 mm 間격일 때 最小값이 되고 그 이하나 이상이 되면 上昇하는 것으로 나타난다^[3]. 放電電極의 形狀이 最小 點火 Energy에 미치는 영향은 球狀 電極보다는 끝이 뾰족한 針狀 (Needle Point) 電極이 曲率 半徑이 작기 때문에 放電이 쉽게 일어나게 되어 最小 點火 Energy가 작다. 따라서 本 實驗에서는 放電電極으로 兩極이 모두 針狀인 電極을 사용하였고, 그 間隙은 1 mm 정도로 維持하였다.

나. 點火 Energy 測定實驗 方法 (Sequence)

설치된 실험장치를 이용하여 可燃性 氣體의 點火 Energy를 측정하는 방법 (Sequence)은 다음과 같다. (그림 5.3 참조)

- ① 測定實驗 실시 전에 원하는 成分比의 混合氣體를 조성한 후 가스 혼합 탱크 (運搬用)에 넣어 둔다.
- ② Gas 混合탱크를 爆發桶의 가스 供給 Line에 연결한다.

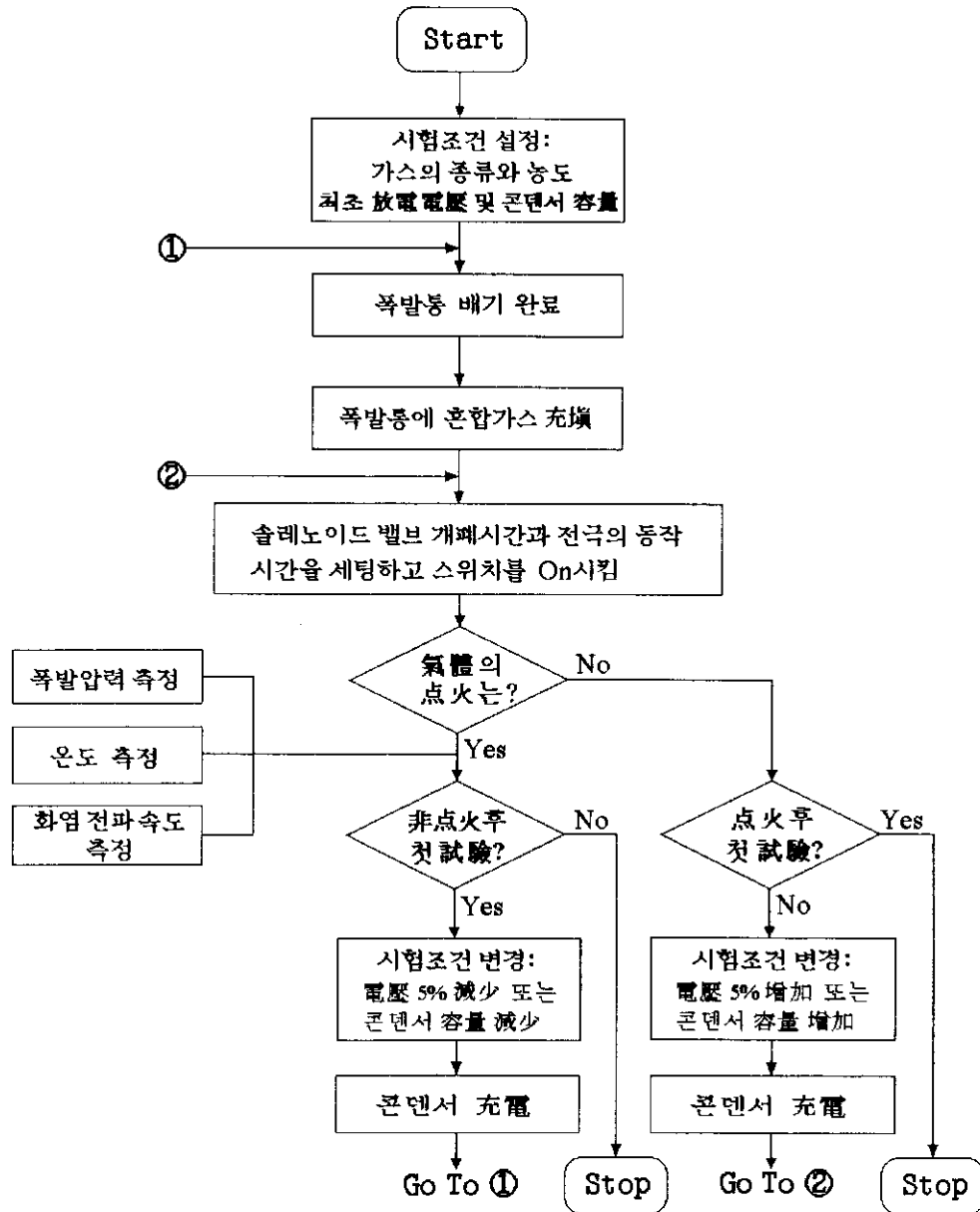


그림 5.3 可燃性 混合氣體의 點火 Energy 測定 實驗 順序圖

- ③ 적정 Condenser를 選擇하여 연결한다. (容量 및 耐電壓, 直·並列 확인)

- ④ 直流 高電壓 電源을 On시켜 원하는 電壓으로 Setting 한다.
 - ⑤ 高壓 Relay를 작동시켜 ③에서 선택한 Condenser를 充電시킨다.
 - ⑥ 眞空펌프를 작동시켜 爆發桶을 排氣시킨다. (약 750 mmHg)
 - ⑦ 爆發桶에 混合가스를 充填시킨다. (大氣壓 조건)
 - ⑧ 爆發桶내의 混合가스 壓力이 大氣壓이 될 때까지 기다린다.
 - ⑨ 針狀으로 된 電極 (Electrode)에 放電시킨다.
 - ⑩ 가스의 點火 爆發 有無를 확인한다.
 - ⑪-1 點火 爆發이 일어났을 때는 (i) 사전에 준비된 데이터 처리장치를 작동시켜 爆發時의 압력, 온도, 화염 전파 속도를 기록시킨다. 추후 이 데이터는 컴퓨터로 처리하여 그 출력을 보관한다. (ii) 직류 고압 전원의 전압을 5% 감소시키거나 Condenser 용량이 작은 것을 선택한다. (iii)상기 ⑤로 되돌아간다.
 - ⑪-2 點火 爆發이 일어나지 않았을 때는 (i) 직류 고압 전원의 전압을 5% 상승시키거나 Condenser 용량이 큰 것을 선택한다. (ii) 상기 ⑤로 되돌아간다.
- * 點火와 非點火의 편차 범위가 5% 이내가 되면 시험을 종료한다.

다. 실험시 주의사항

- ① 可燃性 가스의 爆發 實驗후 混合가스 容器 내에 남아 있는 殘存 가스의 排出은 옥외로 하여야 한다.
- ② 진공 펌프를 이용한 爆發桶의 排氣는 고무호스를 통하여 실외로 배출시켜야 한다.
- ③ 實驗時 火氣의 사용은 嚴禁하여야 한다.
- ④ 實驗時 창문 등을 열어 되도록 換氣가 잘 되도록 하여야 한다.

- ⑤ 粉塵 實驗時는 Air Filter를 확인하여 물기를 제거하여야 한다.
- ⑥ 眞空펌프의 오일을 점검하여 부족 시는 보충하여야 한다.
- ⑦ 混合가스 운반용 탱크는 운반 시에 충격이 가해지지 않도록 하여야 한다.

5.2 測定點의 決定 方法

測定實驗을 위한 混合氣體의 成分混合比 (測定點)의 결정 방법은 실험 목적상 여러 가지가 있겠지만 여기서는 다음과 같은 방법으로 測定點을 결정하였다. (그림 5.4 참조)

- ① 정삼각형을 그려 삼각형 밑변의 양 꼭지점에 실험하고자 하는 2種의 可燃性 Gas를 나머지 꼭지점에 공기를 정한다.
- ② 空氣를 중심으로 하여 마주보는 변을 四等分한다.
- ③ 實驗하고자 하는 可燃性 Gas의 爆發特性을 찾아낸다.
- ④ 두 Gas의 爆發上限界 (Explosion Upper Limit: EUL)와 爆發下限界 (Explosion Lower Limit: ELL) 및 單一 Gas에서의 最小 點火 Energy를 측정한 Vol.%를 찾아낸다.
- ⑤ 위 ④의 爆發 特性을 單一 Gas와 空氣와의 정삼각형의 변의 全體 距離를 100 %로 하여 거리에 따른 Vol.%로 EUL, ELL 및 MIE 點을 그린다.
- ⑥ 두 Gas 사이의 點을 서로 연결한다.
- ⑦ 두 Gas의 MIE 선과 EUL, ELL 선 사이를 二等分한다.
- ⑧ 위 ⑥의 二等分線과 MIE 線 사이를 다시 二等分한다.
- ⑨ 全體 七等分된 선 중에서 EUL 및 ELL의 두 線을 제외한 (爆發 上·下限界 線에서는 爆發이 잘 일어나지 않음.) 五等分 線과 위 ②에서

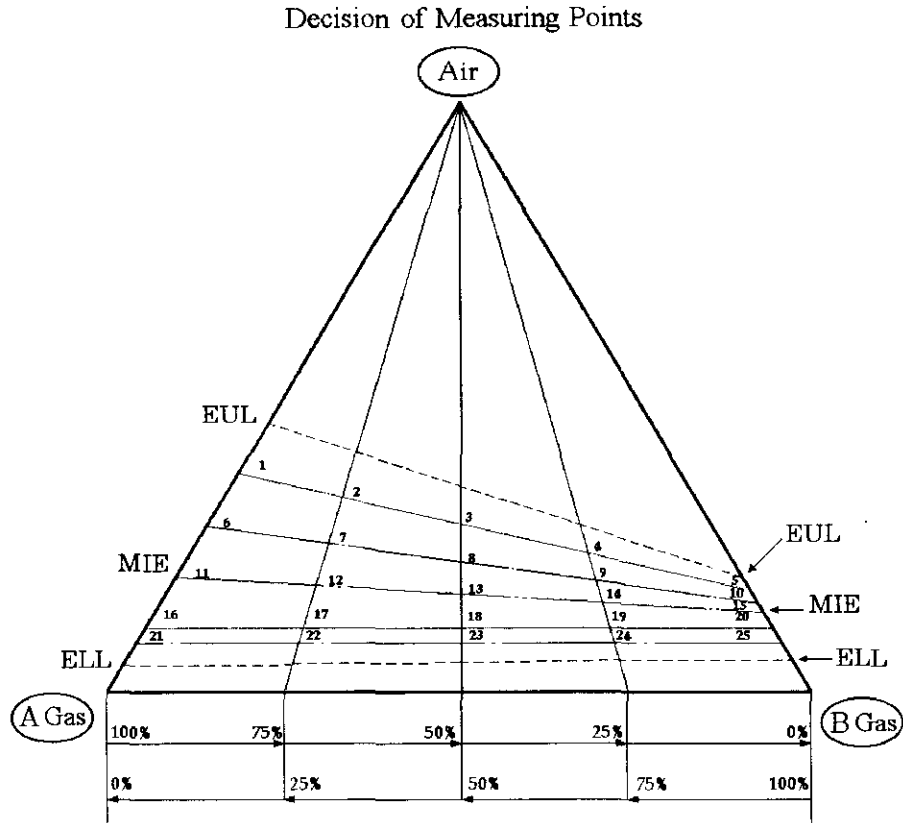


그림 5.4 測定點 (Measuring Points)의 選定

공기를 중심으로 하여 두 混合 Gas 사이를 四等分한 線의 交叉點을 實驗의 測定點으로 결정한다.

- ⑩ 각 交叉點을 위에서 아래로, 좌에서 우로 일련 번호를 기입한다. (#1 ~ #25)

例: Point #2의 경우

공기는 80 %, A+B Gas는 20 %이다. A+B Gas 중에서 A Gas 對

B Gas의 비는 3 : 1이다.

그림 5.5는 Propane-水素-空氣 三成分系 混合氣體의 爆發範圍 및 각 測定點을 선정한 것이다. 그림 5.5의 각 測定點에서 구한 空氣, Propane Gas, 水素 Gas의 Vol.%를 구하여 이를 다시 混合 Gas로 조성하기 위한 Digital 眞空計의 Torr 값에 對應시켜야 한다. 爆發桶에 送入된 混合氣體의 全體 內部 壓力은 항상 1 氣壓 (760 Torr)이 된다.

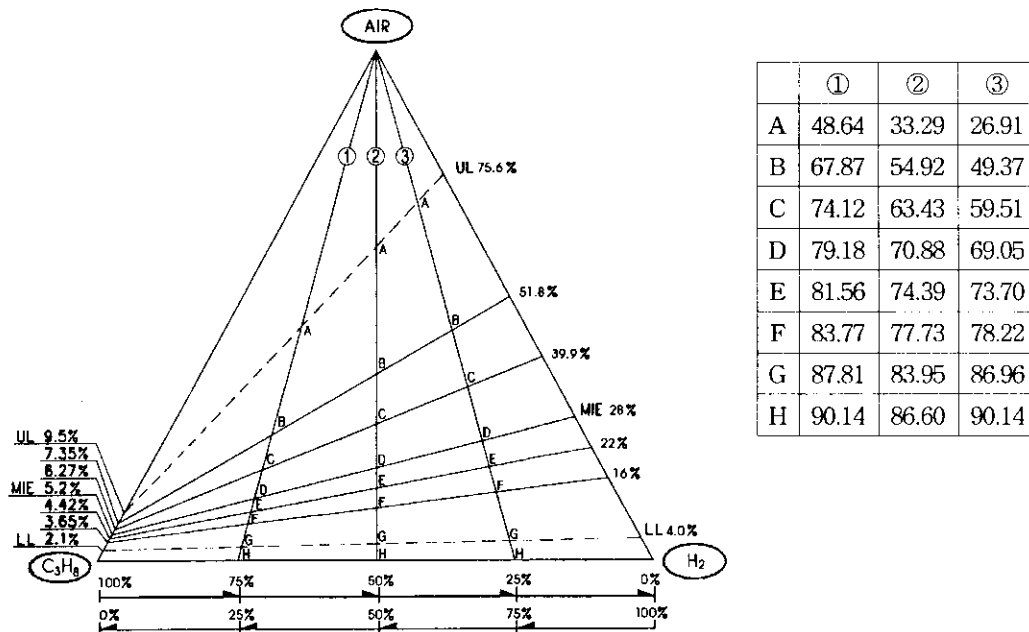


그림 5.5 三成分系 (水素-Propane-空氣)의 測定點 決定方法

5.3 實驗 結果 및 分析

본 실험에서는 먼저 自體 設計한 實驗裝置를 사용하여 水素(H₂), Ethylene(C₂H₄), Methane(CH₄) 및 Propane(C₃H₈) 등이 空氣와 혼합된 二成

分系 可燃性 氣體에 대한 點火 Energy 測定實驗을 실시하였다. 이어서 이 Gas들을 두 가지씩 1:3, 2:2 및 3:1의 vol.% 比가 되도록 섞어 空氣와 混合된 三成分系 可燃性 混合氣體의 點火 Energy를 측정하였다. 그림 5.6 ~ 5.11은 이 실험 결과를 Plot한 것이다.

이 結果중 單一 Gas의 MIE 값은 이미 측정한 값과 대략 일치하지만 Condenser의 容量에 따라서 可燃性 Gas의 最小 點火 Energy의 변화가 크게 나타나므로 정확한 값을 얻기 위해서는 小容量의 Condenser (예를 들면 5 pF 등)이 필요하고 이 容量을 적절히 조절하는 것이 매우 중요하다.

Propane(C_3H_8)-空氣 등 二成分系 可燃性 Gas 4種과 Ethylene-Methane-空氣 등 三成分系 混合氣體 6種의 點火 Energy를 測定한 實驗結果를 정리, 要約하면 다음과 같다.

- (1) 單一 Gas일 때는 Ethylene (C_2H_4) Gas의 경우는 6.5 vol.%에서 最小 點火 Energy (MIE)가 약 0.11 mJ로 나타났고, Methane (CH_4) Gas는 8.3 vol.%에서 MIE가 약 0.81 mJ로 나왔다. 水素 (H_2) Gas는 28 vol.%에서 MIE가 약 0.04 mJ로 나타났고, Propane (C_3H_8) Gas는 5.2 vol.%에서 MIE가 약 0.9 mJ로 測定됐다.
- (2) Ethylene (C_2H_4)과 Methane (CH_4)의 混合氣體의 경우, Ethylene의 混合比率이 증가할수록 MIE가 감소하였는데 Ethylene의 混合比가 半以上이면 Ethylene 單一 成分일 때의 MIE와 거의 유사하게 나타났다 (0.16 mJ). 즉 Ethylene-Methane 混合氣體의 MIE는 MIE가 낮은 Ethylene에 의하여 영향을 많이 받는 것을 알 수 있다. 물론 이 混合氣體의 MIE와 燃燒範圍는 Ethylene과 Methane의 그것들 사이에 存在한다. (그림 5.6)

- (3) Ethylene과 Propane(C_3H_8)의 混合氣體는 混合比에 거의 관계없이 MIE가 Ethylene의 MIE보다 모두 높아져서 Propane의 MIE와 유사하게 나타나고 있다 (0.79 mJ). 그러나 爆發範圍는 Propane의 그것보다 훨씬 넓어지고 있다. (그림 5.7)
- (4) Methane (CH_4)-Propane (C_3H_8) 混合氣體의 MIE는 어느 한 Gas가 단독으로 있을 때보다 훨씬 증가하는 것으로 나타났다. 즉 이 混合氣體는 단일 성분으로 있을 때보다 안전하다. 두 Gas가 50 : 50으로 混合되어 空氣중의 vol.%가 약 7.2 %일 때 MIE가 약 5.7 mJ로 나타났다. 爆發範圍의 上限界·下限界 각각 두 Gas의 上限界 사이와 下限界 사이에 존재하여 爆發範圍는 대체적으로 넓어지는 것으로 보여진다. (그림 5.8)
- (5) 水素(H_2)가 포함된 混合氣體는 MIE를 찾는 실험이 만족스럽게 이루어지지 않았다. 우리가 갖고 있는 Condenser의 容量은 2000 pF (이 경우 얻을 수 있는 放電 Energy는 약 200 mJ)으로서 그림 5.3의 방법에 의하여 선정된 地點에서는 點火 爆發이 발생하지 않았다. 이로 미루어 볼 때 點火 Energy는 2000 pF를 사용해서 얻는 點火 Energy보다 훨씬 큰 것으로 볼 수 있다. (大容量의 Capacitance를 얻기 위해서 並列 연결해서 쓸 수 있는 방법도 있겠으나 이 경우 耐電壓이 낮아져 Condenser가 파괴되어 버린다.)
- (6) Methane (CH_4)-水素 (H_2) 混合氣體의 MIE는 $CH_4 : H_2 = 1 : 3$ 의 比率로 混合했을 때의 全體 濃度 14.4 vol.%에서 약 0.07 mJ로 판단된다. 爆發範圍는 Methane보다는 훨씬 넓어지고 있으며, 같은 濃度에서는 點火 Energy가 상대적으로 매우 낮았다. (그림 5.9)

- (7) Ethylene (C_2H_4)-水素 (H_2) 混合氣體의 MIE는 $C_2H_4 : H_2 = 1 : 3$ 의 比率로 混合됐을 때의 全體 濃度 19 vol.%에서 약 0.11 mJ로 算定됐으나, 이 混合氣體의 경우는 混合比의 상관없이 Ethylene의 MIE와 유사하게 나타나고 있다. 이 역시 爆發範圍는 Ethylene보다는 훨씬 넓어지고 있으며, 같은 濃度에서는 點火 Energy가 매우 낮았다. (그림 5.10)
- (8) Propane (C_3H_8)-水素 (H_2) 混合氣體의 MIE는 $C_3H_8 : H_2 = 1 : 3$ 의 比率로 混合됐을 때의 全體 濃度 13.6 vol.%에서 약 0.89 mJ로 算定됐다. 水素의 混合比가 증가할수록 爆發 上限界는 水素 쪽으로 올라가서 爆發範圍가 매우 넓어지고 있다. (그림 5.11)
- (9) 最小 點火 Energy의 信賴性에 영향을 주는 것은 Condenser Capacitance의 精確한 維持인데, 이것은 Stray Capacitance의 영향을 받아서 正確度를 유지하기가 매우 어려웠다.

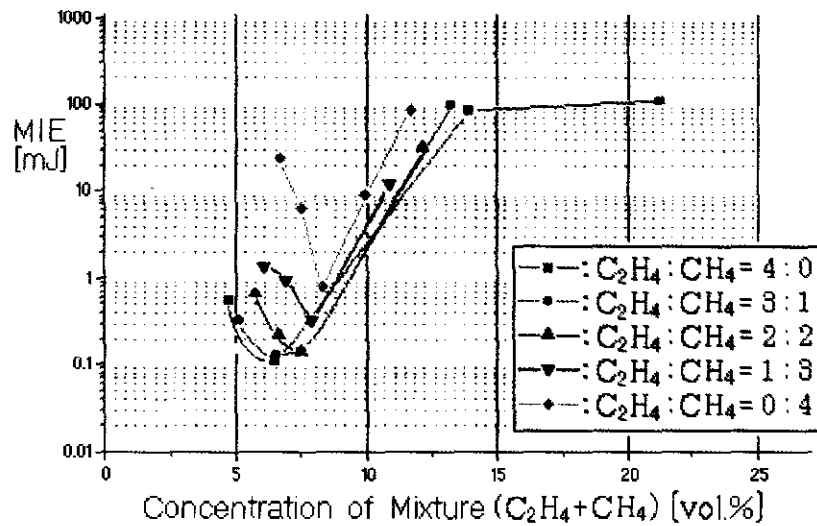


그림 5.6 Ethylene-Methane-空氣 混合氣體의 點火 Energy
(日本 産業安全研究所에서 測定; 1996. 7.)

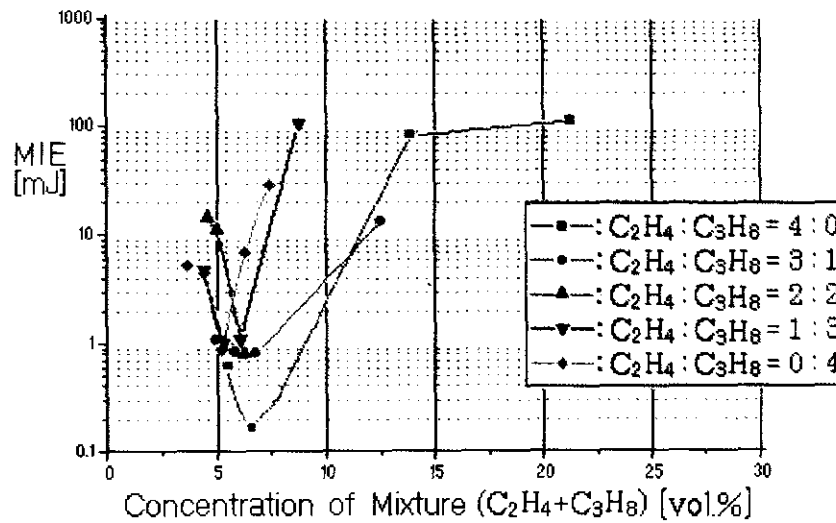


그림 5.7 Ethylene-Propane 空氣 混合氣體의 點火 Energy

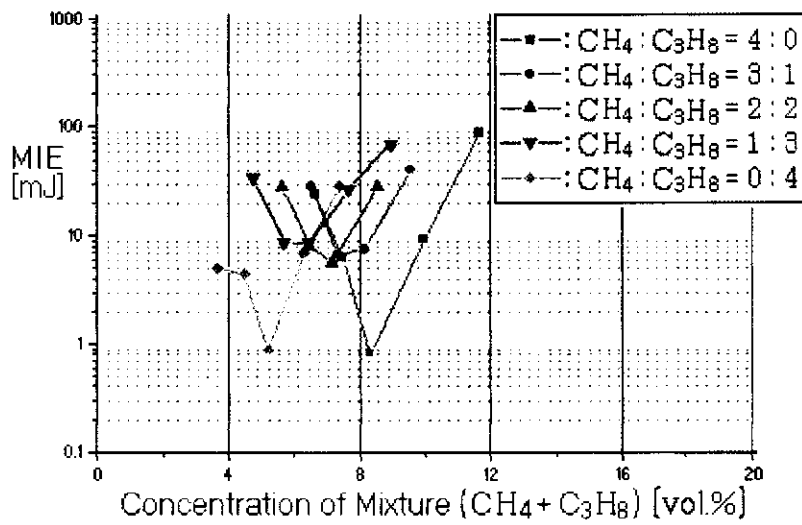


그림 5.8 Methane-Propane-空氣 混合氣體의 點火 Energy

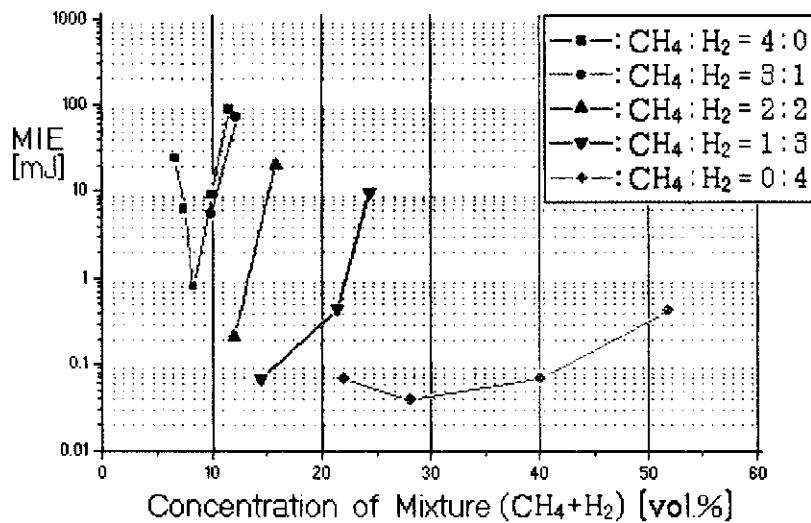


그림 5.9 Methane-水素-空氣 混合氣體의 點火 Energy

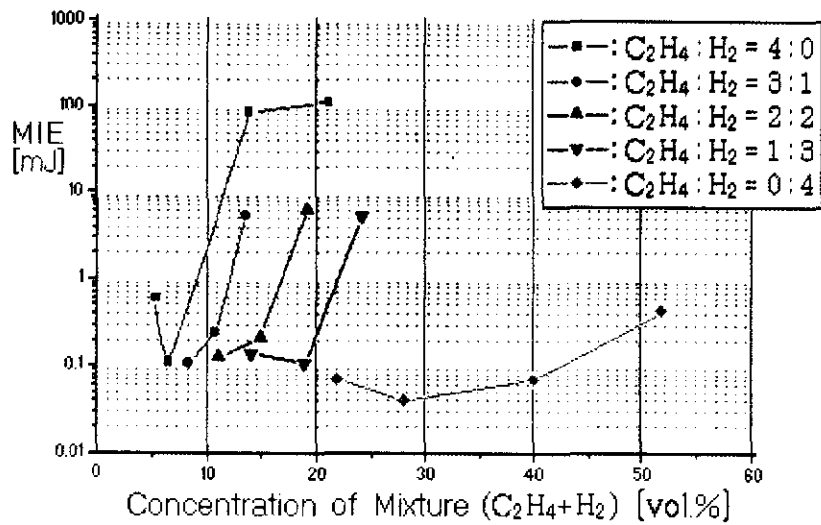


그림 5.10 Ethylene-水素-空氣 混合氣體의 點火 Energy

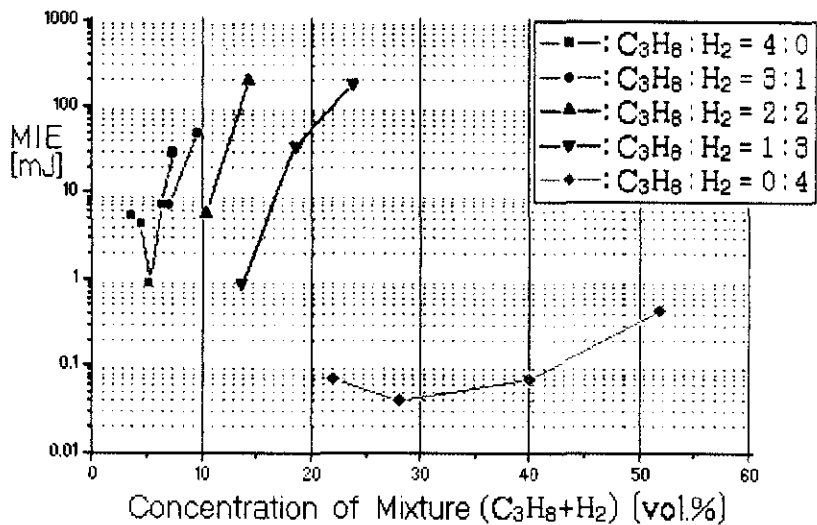


그림 5.11 Propane-水素-空氣 混合氣體의 點火 Energy

6. 맺음말

石油 化學 工場을 비롯한 産業 現場에서 빈번히 발생하고 있는 火災·爆發 災害는 可燃性 物質, 支燃性 物質 및 點火源으로 일컬어지는 三要素를 적절히 管理하지 못하는데서 비롯되는 경우가 많다. 보통의 환경에서 支燃性 物質인 空氣는 어디에나 存在하므로 이를 관리하기는 사실상 불가능하다고 볼 수 있다. 그러나 可燃性 物質과 點火源은 우리가 그 生成 메커니즘을 이해하고 적절히 對處한다면 얼마든지 防護할 수가 있다. 이 두 要素중 어느 한 要素만 완벽히 防護된다면 우리 事業場에서 큰 災殃을 초래하는 火災·爆發 災害를 豫防할 수 있을 것이다.

可燃性 物質은 單一 成分으로 존재하는 경우도 있겠으나 대부분의 경우는 두 가지 이상이 함께 混在하는 混合物質의 형태로 있는 경우가 많다. 그 동안 單一 成分의 可燃性 가스에 대한 最小 點火 Energy 및 點火 메커니즘에 관한 연구는 많이 진행되어 왔다. 그러나 두 가지 이상의 成分이 혼합된 可燃性 混合氣體의 最小 點火 Energy 및 點火 메커니즘에 관한 연구는 아직까지 이루어지지 않고 있다. 본 研究는 靜電氣의 放電 Energy가 點火源으로 작용하여 可燃性 混合氣體의 火災·爆發을 예방하기 위하여 三成分系 混合氣體의 最小 點火 Energy 등을 규명하기 위한 研究의 첫 段階로서 遂行하였다.

먼저 靜電氣 放電과 點火 Energy의 관계, 그리고 可燃性 物質의 點火 메커니즘 등을 살펴보았다. 이어서 可燃性 混合氣體의 點火 Energy를 測定하기 위한 實驗裝置를 구상하여 設計하였고, 이를 外部 業體에 發走하여 製作·設置하였다. 이 과정에서 高電壓用 Condenser 등 部品을 確保하는데 어려움이 많았고, 수많은 施行錯誤를 거쳐서야 본 研究에서 필요한 測定 實驗에 사용할 수 있는 裝置를 완성하였다. 그러나 처음 만든 裝置라서 아직도 精密 測

定을 위해서는 가스 混合氣 등 보완이 필요한 부분이 많이 있다.

單一 Gas의 點火 Energy 測定實驗의 결과는 外國 資料에 나와 있는 既存의 Data와 다소 차이가 있는 것으로 나타났는데, 이는 日本 産業安全研究所의 施設을 이용해서 실시한 實驗에서도 마찬가지로 나타난 현상으로서, 周邊 環境 (溫度, 壓力 등)의 차이와 點火 Energy의 間接 測定 方法으로 인한 精密度의 부족에서 기인한 것으로 판단되며 추후 細密한 補完이 필요하다. 그러나 여러 차례의 걸친 反復 實驗에서는 類似한 결과가 나와 再現性에는 문제가 없는 것으로 확인되었다. 따라서 본 實驗裝置만으로도 일반 産業現場에서 安全性을 확보하는데 필요한 可燃性 混合氣體의 點火 Energy의 개괄적인 값이나 變化 傾向을 알아보는 데 있어서는 충분하다고 판단된다.

본 實驗에서는 두 가지 可燃性 Gas와 空氣로 이루어진 三成分系 混合氣體의 點火 Energy 測定 實驗을 실시하였고, 이 실험 Data를 바탕으로 하여 Methane-水素, Ethylene-Methane, Ethylene-水素, Ethylene-Propane, Propane-水素, Methane-Propane 등 6가지 可燃性 混合氣體의 點火 Energy를 Plot化하였다. 이 Plot化된 각각의 點火 Energy - 濃度 曲線으로부터 Ethylene-Methane, Ethylene-Propane, Methane-Propane 混合氣體의 最小 點火 Energy의 推定이 可能하다.

이 曲線들은 또한 여러 가지 Gas를 混合시킨 混合氣體에 있어서 最小 點火 Energy와 爆發範圍는 그 混合氣體를 구성하고 있는 單一 成分 Gas의 그것들과 判異함을 나타내고 있어, 우리가 混合氣體의 危險性を 함부로 豫測해서는 안된다는 사실을 보여주고 있다. 예를 들면, Ethylene과 Propane의 混合氣體는 混合比에 거의 관계없이 MIE가 Ethylene의 MIE보다 모두 높아져서 Propane의 MIE와 類似하게 나타나고 있고 (0.79 mJ), 爆發範圍는 Propane의 그것보다 훨씬 넓어지고 있다. 반면에 Methane-Propane 混合氣體의 MIE는 약 5.7 mJ로 나타나 어느 한 Gas가 단독으로 있을 때보다 훨씬

증가하여 單一 成分의 Gas로 있을 때보다 混合되어 있을 때 오히려 安全하다고 할 수 있다. 그러나 두 가지 이상의 可燃性 Gas가 混合될 때 安全을 위해서는 混合氣體의 MIE는 그 混合氣體를 구성하고 있는 여러 Gas들 중에서 MIE가 가장 낮은 것을 고려하고, 爆發範圍는 가장 낮은 下限界와 가장 높은 上限界 사이로 推定하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

水素 Gas를 포함하고 있는 混合氣體의 경우는 그 點火 Energy가 豫測値보다 낮게 나타나는 등 완전한 實驗을 할 수가 없었다. 또한, 우리가 보유하고 있는 Condenser의 容量이 最大 2000 pF이어서 放電電壓을 마음대로 높일 수가 없었다. 높은 Capacitance를 얻기 위하여 Condenser들을 並列 連結할 경우 耐電壓이 낮아져서 破壞된다. 따라서 水素 混合氣體의 경우는 앞으로 補完되어져야 할 사항이 많은데 이는 向後 課題로 남겨 두고자 한다.

본 研究는 우리나라에서 이 分野의 첫 단계 研究로서 시도되었는바, 향후 여기서 얻어진 經驗을 바탕으로 하여 많은 것들이 補完되어져야 보다 완벽한 데이터를 얻을 수 있을 것이다. 點火 Energy의 測定點 (混合成分比)을 細分하여 測定하고 또한 點火 Energy의 測定을 가능한 한 上·下限界 부근으로 확대하여 精確한 爆發範圍도 확인되어야 할 과제이다. 또한 앞으로는 可燃性 混合氣體뿐만 아니라 可燃性 粉塵 混合物 및 可燃性 가스-粉塵 混合物의 最小 點火 Energy와 點火 메커니즘을 糾明하는 研究도 계속해서 遂行되어져야 할 것이다.

附錄 A: 靜電氣의 帶電

A.1 靜電氣 帶電의 種類

靜電氣는 매우 다양한 방법으로 발생한다. 가장 흔하게는 성질이 다른 두 物體가 接觸하여 서로 相對的인 運動을 할 때 발생한다. 靜電氣가 發生하여 外部로 漏泄되지 않고 物體 어느 부분에 蓄積되는 것을 帶電이라고 하는데 이러한 靜電氣의 帶電 方式에는 다음과 같은 것들이 있다.

(1) 接觸 帶電 (Triboelectric Charging)

異質의 두 物體가 (1) 接觸(Contact)할 때, (2) 접촉하여 서로 摩擦(Rubbing)할 때, (3) 接觸되어 있다가 分離(Separation)할 때는 物體간에 電子의 移動이 일어나, 電子를 내보낸 物體는 陽電氣로 帶電되고, 電子를 받아드린 物體는 陰電氣로 帶電된다. 이와 같은 帶電을 摩擦帶電 (Tribocharging) 또는 接觸帶電 (Contact Charging)이라고 하며, 이 때 發生되는 電氣를 摩擦電氣 (Triboelectricity)라고 한다.

종이같이 얇은 物體는 서로 密着되어 있다가 떨어지게 되면 表面에 있는 電荷의 分離가 일어나 靜電氣가 발생하게 된다. 이와 같은 것을 摩擦 帶電에 對應하여 剝離帶電이라고도 한다.

(2) 誘導 帶電 (Induction Charging)

帶電된 物體 주위에는 電氣場이 存在하게 된다. 어떤 導體가 이 電氣場속에 놓여지게 되면 그 導體 주변의 電氣場내의 電位分布를 변화시키는 동시에

이 電氣場의 영향으로 導體내에서 反對 極性을 가진 電荷의 分離가 일어난다. 즉, 帶電되어 있지 않은 物體가 帶電體에 의한 電氣場에 露出되면 電荷의 分極이 일어나 가까운 쪽에는 反對 極性의 電荷가, 먼 쪽에는 같은 極性의 電荷가 모이게 된다. 이 때 物體가 絶緣되어 있거나, 어느 한 쪽에서 接地 等에 의하여 電荷를 끌어내면 이 物體는 帶電體가 되는데 이러한 帶電을 誘導에 의한 帶電이라고 한다.

誘導 帶電은 接地되지 않은 物體가 分極 (Polarization)될 때 발생하는 것으로서, 直接的인 接觸에 의하지 않고도 被害가 발생할 수 있다.

(3) 噴出 帶電 (Spray Charging)

液體를 機械적으로 Ion化할 때 噴出되어 나오는 粒子가 極性을 띄게 되는 현상이다. 粉塵이나 液體 또는 氣體 상태의 물질이 斷面積이 작은 噴出口를 통해 空氣 중으로 噴出될 때 噴出되는 物質과 噴出口와의 摩擦이나 衝突에 의하여 靜電氣가 발생하게 된다. 이 경우 분출하는 物質과 噴出口를 구성하는 物質과의 摩擦에 의해서도 靜電氣가 발생하나, 噴出物속에 섞여 있는 異物質 粒子간의 相互 衝突 또는 噴出되어 나오는 物質과 外部에 있는 物質간의 衝突에 의하여도 靜電氣가 발생하게 된다.

(4) 流動 帶電

液體가 容器나 管 내에서 攪拌하거나 流動할 때 액체와 용기벽 또는 管벽 사이에 靜電氣가 발생한다. 이는 液體가 固體와 접촉하면 境界면에 電氣 二重層이 형성되어 이때 발생된 전하의 일부가 液體와 함께 流動하기 때문에 생기는 현상이다. 이 때 靜電氣 발생에 크게 영향을 끼치는 요인은 液體의

流動 速度와 흐름 상태, 容器 또는 管의 形態 및 材質 등이다.

(5) 其他 帶電

Ion이나 電子, Alpha 粒子들의 Beam이나, 紫外線, X-Ray, Gamma 線과 같은 電磁波 (Electromagnetic Radiation)가 粉體나 空氣 分子와 衝突할 때 放出되는 自由電子가 주위의 空氣 分子와 結合하여 帶電을 시키는데 이러한 帶電 현상을 照射帶電 (Ion Beam Charging)이라고 한다.

이 외에도 局部的인 高溫으로 인하여 電子가 放出되는 Thermionic Emission Charging, 빛에 의하여 電子가 방출되는 Photoelectric Charging, 電氣場에 의해 발생하는 Field Emission Charging 및 Corona Charging, 그리고 物體가 破壞될 때 破壞面에서 電荷의 分離나 正, 負 電荷의 均衡이 깨지면서 일어나는 帶電 등이 있다.

A.2 靜電氣 發生에 影響을 미치는 要因

靜電氣는 異物質間에 접촉이 이루어지는 日常的인 活動과 事業場내의 많은 工程에서 다양하게 발생한다. 여기서는 이러한 靜電氣가 발생하는 實際 狀況과 靜電氣 發生에 영향을 끼치는 여러 가지 要因들을 간략히 살펴보고자 한다.

(1) 物體의 種類

接觸이나 摩擦에 의하여 일어나는 帶電은 帶電序列이라고 불리는 物質의 序列上 相對的 位置에 영향을 받는다. 어떤 두 물체를 접촉시키거나 마찰할 때 物體가 帶電되는 양상은 Faraday가 처음 제시한바 있는 帶電序列

(Trobelectric Series)에 의하여 결정된다. 帶電序列에서 서로 멀리 떨어진 물질간일수록 靜電荷가 많이 발생하며, 序列의 위쪽 (+측)의 物質이 電子를 잃게 되어 陽(+)으로 帶電되고 아래쪽 (-측)의 物質이 電子를 얻어 陰(-)으로 帶電된다. 또한 帶電序列에서 서로 멀리 떨어져 있는 물체일수록 靜電氣의 發生이 용이하여 帶電量이 많아지게 된다. 예를 들면, 머리털[毛髮]과 PVC가 비벼지는 경우가 Nylon과 綿이 비벼지는 경우보다 靜電氣가 더 많이 發生하게 된다.

(2) 表面 狀態

表面의 狀態는 표면의 汚染, 腐蝕, 水分과 같은 화학적인 것과 표면의 凹凸, 거칠음 등과 같은 물리적인 것이 있다. 일반적으로 표면이 깨끗하거나 平滑할 때 靜電氣의 발생이 적다.

(3) 接觸面積 및 接觸壓力

물체간의 接觸面積이 클수록 靜電氣의 발생량은 많아진다. 接觸壓力은 실질적으로 接觸面積과 관계가 있어 이 壓力이 클수록 접촉면적도 커져 靜電氣의 발생량이 많아지게 된다.

(4) 帶電 履歷

동일한 물질과 조건에서도 連續적으로 일어나는 靜電氣의 발생량은 처음에는 많다가 점차 줄어들어 어느 수준에 이르러서야 일정하게 된다. 다시 말하면 어떤 물질에 있어서 靜電氣의 발생은 그전에 일어났던 그 물체의 帶電履歷에도 영향을 받는다. 이는 帶電에 따라 물체 表面의 狀態가 변화하

기 때문이다.

(5) 分離 速度

分離速度가 크면 發生된 電荷의 再結合이 적게 일어나 靜電氣의 발생량이 많아지게 된다. 급한 發進, 停止, 變速 등은 分離速度를 크게 하여 靜電氣의 발생량이 많아지므로 回避하여야 한다.

(6) 기타 要因

기타 靜電氣 發生에 영향을 미치는 요인으로는 溫度, 濕度, 不純物 등을 들 수 있다.

溫度가 높으면 靜電氣 發生은 많아지는 경향이 있다.

濕도가 높으면 物體表面에 水分이 많이 생겨 帶電된 靜電氣를 漏泄시켜 제거하는데 도움을 준다.

不純物이 많으면 靜電氣의 發生량은 증가하나 導電率도 커져 發生된 電荷를 더 많이 漏泄시키므로 殘留하는 靜電氣의 量은 어느 한도 이상에서는 오히려 감소할 수 있다.

靜電氣에 의한 火災·爆發 災害를 防止하기 위해서는 무엇보다도 靜電氣의 發生을 抑制하거나 發生된 靜電氣를 즉시 漏泄 또는 除去시켜서 靜電氣가 物體에 帶電되는 것을 막는 것이 우선적으로 講究되어야 한다.

附錄 B: 點火性 放電의 發生 防止

靜電氣에 의한 火災·爆發 災害를 방지하기 위해서는 무엇보다도 먼저 可燃性 가스·蒸氣 등의 可燃性 物質이 空氣 (酸素)와 같은 支燃性 物質과 混合되어 생기는 爆發性 霧圍氣의 生成을 막아야 할 것이다. 그러나 이러한 爆發性 霧圍氣의 生成을 억제할 수 없는 事業場이나 生成 可能의 우려가 있는 場所에서는 이 爆發性 混合氣體를 點火시키는데 필요한 點火 Energy보다 큰 Energy를 發生하는 靜電氣 放電이 일어나지 않도록 해야 한다.

放電은 일반적으로 두개의 電極 사이에 있는 誘電媒質에서 발생한다. 靜電氣放電의 경우는 한 쪽 電極이 帶電物體가 되고, 다른 電極이 接地體, 人體, 構造物 등이 될 수 있다. 따라서 放電이 두 物體간에 발생하므로 點火性 放電이 발생되는지의 여부는 帶電物體의 特性만으로 결정되는 것이 아니며, 다른 쪽의 電極을 형성하는 物質의 特性에 따라서도 影響을 받는다.

點火性 放電을 防止하기 먼저 爆發性 霧圍氣내에서 靜電氣가 생성되는 것을 抑制하거나 生成된 電荷를 漏泄시켜 電荷의 蓄積을 위험하지 않는 수준 이내로 維持하는 일이다. 이를 위해서는 무엇보다도 다음과 같은 사항을 철저히 준수할 필요가 있다.

- ① 모든 導電性 部品에 대하여 靜電氣 接地를 실시한다. 즉, 導電體 어느 점에서든 抵抗이 $10^6 \Omega$ 이하로 接地되면 靜電氣가 蓄積되지 않는다.
- ② 움직이는 物體의 電氣抵抗을 작게 한다.
- ③ 靜電氣 放電이 일어날 수 있는 製品에는 接地된 金屬片을 삽입한다.
- ④ 相對 空氣 濕度を 增加시킨다. 즉 相對 空氣 濕度を 약 65% 정도 올리면 대부분의 不導體의 表面 抵抗이 靜電氣를 漏泄시킬 수 있는 정도로 충분히 감소된다.

⑤ 空氣를 Ion化시켜 靜電氣의 帶電을 防止한다.

좀더 구체적인 點火性 靜電氣 放電을 防止하는 方法을 몇 가지 살펴보면 다음과 같다.

(1) 浮遊導體의 靜電接地

일반적으로 固有抵抗이 $10^6 \Omega \cdot m$ 정도 以下の 物體는 金屬과 거의 동일한 導體로 취급하여, 點火性 放電의 發生 防止對策의 하나로서 이를 靜電接地한다. 이와 같은 導體가 大地로부터 絶緣되어 있으면, 帶電될 경우 點火性 放電이 일어날 우려가 있기 때문이다.

浮遊導體를 接地한다는 그 接地 對象이 帶電된 導體뿐만 아니고 帶電物體 근처에 있는 導體까지를 의미한다. 왜냐하면 浮遊 導體가 帶電物體 근처에 있으면 이것이 靜電誘導를 받아 點火性 放電을 일으킬 가능성이 있기 때문이다. 다시 말해 接地의 對象은 摩擦 등에 의하여 帶電이 되는 物體뿐만 아니라 이 帶電物體 근처에 있는 導體도 포함한다. 실제로 帶電物體 근처의 接地 되지 않은 導體가 放電을 일으켜 일어난 災害가 일본에서 보고되고 있는데, 예를 들면 Ceramic, 樹脂 등으로 둘러 쌓여 絶緣되어 있는 金屬物體와 金屬線, Tefron 등에 의하여 絶緣되어 있는 金屬製 回轉物體 등이다. 특히 移動하는 導體는 常時 接地가 어려워 대표적인 浮遊 導體가 되어서 點火性 放電을 일으키는 事例가 많다고 한다. 예를 들면, 人體나 運搬用 車輛 등이 이에 해당한다고 볼 수 있다.

點火性 放電에 의한 災害를 막기 위해서는 爆發性 雰圍氣가 존재하는 場所에서는 浮遊 導體를 接地하거나 제거하는 일이 중요하다.

(2) 不導體의 帶電防止

固有抵抗이 $10^8 \Omega \cdot m$ 程度 以上이 되는 不導體가 帶電을 하게 되면 點火性 放電이 일어날 가능성이 매우 높다. 예를 들면 Polycarbonate Film이 40 kV 정도로 帶電하면 충분한 點火性 Energy를 가진 放電을 일으키게 된다. 帶電防止에 대한 여러 가지 方法에 대해서는 1993年度 研究報告書^[1]에서 자세히 기술한 바 있으므로 여기서는 생략하고 點火性 放電의 發生 防止 觀點에서 不導體의 帶電防止에 관하여 기술하고자 한다.

點火性 放電을 일으키기 쉬운 帶電物體는 帶電 電荷 密度가 $10^{-5} C/m^2$ 정도 이상이다. 이러한 帶電을 일으키는 것들은 粉體나 液體보다는 Film, 종이, Plastic 등 不導體인 固體物質로서 밀착되어 있는 것을 급격히 떼어 내거나 기계적으로 큰 Energy를 과도하게 공급했을 때 주로 발생한다. 그러므로 點火性 放電을 예방하는 방법 중의 하나로서 速度, 壓力, 張力 등에서 物體의 급격한 變化를 수반하는 취급을 않도록 하는 일이다. 예를 들어 液體나 粉體가 다량으로 공간 중으로 噴出되는 것과 같은 취급은 피해야 할 것이다.

不導體에서 발생하는 點火性 放電은 帶電한 不導體가 넓은 空間에서 취급될 때 일어나기 쉽다. 이 경우는 取扱量도 필연적으로 많아지고 帶電 電荷量이 커지게 되며 放電의 發生 頻度도 높아진다. 따라서 點火性 放電의 예방을 위해서는 전기적으로 좁은 空間에서의 취급이 바람직하다. 예를 들어 可燃性 液體의 貯藏 Tank에 接地된 金屬體 (金屬板, 金屬網, 金屬線 등)를 插入하여 분할하면 點火性 放電을 防止하는데 있어 效果가 크다.

不導體에서 발생하는 靜電氣의 帶電은 剝離帶電 때를 제외하고는 보통의 경우 帶電과 동시에 放電이 일어나는 일은 적다. 일반적으로 시간의 경과와 더불어 不導體의 帶電과 放電이 反復되어 어느 時點까지 帶電된 電荷가 放電된 電荷보다 많게 되면 그 不導體는 帶電體가 되는 것이다. 또한 이 때 발생

하는 최초의 放電은 대부분의 경우 帶電量이 작기 때문에 點火性 放電이 될 수가 없다. 따라서 이러한 放電을 早期에 檢出해낼 수 있으면 이를 바탕으로 하여 點火性 放電을 예방하는 對策을 마련할 수가 있다. 靜電氣 放電을 早期 檢出은 放電時 나오는 電磁波나 불꽃을 이용하면 가능하다. 그러므로 電磁波 探知機를 사용하던가 周邊을 어둡게 한 후 肉眼으로 觀察하는 것이 좋다.

人體에 電擊을 일으키는 放電은 거의 전부가 點火性 放電이 될 수 있기 때문에, 爆發性 霧圍氣에서 人體 電擊 放電을 방지하여야 하고 이를 위해서는 人體에 電擊을 일으킬 수 있는 帶電物體를 早期에 檢出해 내야 한다.

(3) 近接物體의 管理

帶電物體에 接地體가 접근하거나 반대로 帶電物體가 接地體에 접근하면 放電이 발생할 수가 있다. 예를 들면, 帶電物體에 人體가 접근하면 이들 사이에 放電이 발생하여 人體가 電擊을 받기도 하며, 때로는 帶電物體의 電荷가 人體에 옮겨져 人體가 帶電되기도 한다. 여기서 帶電物體에 接近하는 것을 近接物體라고 부르기로 한다.

이와 같이 靜電氣 放電 중에는 近接物體에 의하여 발생하는 것이 많고, 이것이 點火性 放電이 될 경우도 많다. 특히 近接物體가 接地導體이면 點火性 放電이 일어날 가능성이 더 커진다. 더욱이 導體는 靜電誘導를 받기 때문에 點火性 放電이 일어날 경우도 있다. 따라서 點火性 放電의 發生 防止를 위해서는 近接物體의 管理 등에 특별히 有意할 필요가 있다.

우선, 近接物體를 접근시키는 경우는 이에 의해서도 點火性 放電이 발생치 않도록 帶電物體의 電荷를 가능한 한 감소시켜야 한다. 예를 들면 앞에 기술되어 있는 點火性 放電의 發生限界 등을 참고로 하여 여기에 安全係數를 고려한 帶電量까지 電荷를 감소시켜야 한다. 安全係數는 爆發性 混合氣體의

特性, 靜電氣의 發生要因 등을 고려해서 發生限界의 대략 1/10 정도를 고려하는 것이 좋다. 즉, 기본적으로는 近接物體가 있어도 點火性 放電이 발생치 않도록 帶電을 防止하는 것이 바람직하나, 보통 이를 放置하고 있기 때문에 近接物體와의 사이에서 點火性 放電이 발생하여 災害를 유발시키고 있는 것이다. 특히, 移動하는 近接物體에 대해서는 對策을 마련하기가 더욱 어려워 이것이 帶電하고 있으면 帶電物體와의 相乘效果에 의해서 點火性 放電이 발생할 소지가 증가한다. 따라서 近接物體의 접근이 예상되는 帶電物體에는 반드시 除電, 遮蔽 등의 靜電氣 防護對策을 강화해야 한다.

다음으로 近接物體는 接地되어 있거나 되어 있지 않은 경우이나 마찬가지로 帶電物體에 접근시키면 靜電氣 放電이 발생한다. 특히 近接物體가 導體이면 여기에 電界가 集中하기 때문에 靜電氣 放電의 發生 確率이 높아지게 된다. 이에 따라 近接導體의 表面을 絶緣體로 씌운다든지 近接物體를 抵抗接地하는 등의 點火性 放電 防止對策을 실시할 경우 확실히 放電의 發生頻도가 감소하여 點火 確率이 작아질 수가 있다.

그러나 이와 같은 抵抗接地의 效果는 接地回路 또는 이것을 構成하고 있는 物體의 幾何學的 形狀에 의해서도 變化하므로 近接物體를 抵抗接地하면 點火性 放電의 防止가 완전히 해결된다고 할 수는 없다. 그러므로 帶電防止 대책이 다른 어느 것보다도 먼저 우선적으로 고려되어야 한다. 즉 近接物體가 接地된 경우에도 이것이 帶電되어 있으면 接地로 인하여 오히려 點火性 放電의 發生이 용이해질 우려가 있으므로 유의해야 한다. 따라서 接地는 반드시 帶電되기 이전에 爆發性 混合氣體가 없는 장소에서 이루어져야 한다.

한편, 點火性 放電은 앞에서 기술한 바와 같이 近接物體의 形狀과도 관계가 있어, 針狀과 같이 導體의 끝이 대단히 예리한 즉, 曲率半徑이 대단히 작은 形狀이면 點火性 放電이 발생할 확률이 작아진다. 災害 防止 對策의 하나

로서 金屬纖維가 이용되는 것도 이 원리를 활용한 것이다. 따라서 近接物體에 針狀과 같이 끝이 뾰족한 부분을 만들어 이 부분이 帶電物體를 향해서 接近하도록 하면 點火性 放電의 發生을 크게 억제할 수 있다.

또한, 帶電物體에 近接物體가 접근하는 部分에 接地體를 설치하면 그 部分의 電位가 減少하고 電氣的 空間을 작게 하는 效果도 있어, 放電의 發生頻도가 크게 減少한다. 이는 電荷蓄積의 抑制로서가 아니라 放電의 發生 頻度を 적게 하는 의미로서 點火性 放電의 發生 防止 對策의 하나로서 有效하게 이용된다.

끝으로, 近接物體를 接近시킬 때 接近 速度가 빠르면 點火性 放電이 발생하기 쉽고, 接近과 後退를 조금씩 反復시키면서 接近시키면 點火性 放電이 발생하기 어려우므로 作業 形態에 따라서는 이 原理를 고려해 보는 것도 유익할 수 있다.

參 考 文 獻

- [1] 李寬珩, 靜電氣 災害의 豫防 (I), 韓國産業安全公團 産業安全研究院, 研究報告書, 기전연 93-8-14, 1993. 12.
- [2] 李寬珩, 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. 12.
- [3] 鄭載喜 外, “可燃性 混合 Gas의 最小 着火 Energy에 관한 연구” 한국산업안전학회, '95 秋季 學術論文 發表會 論文草綠集, 1995. 10.
- [4] 日本 靜電氣學會 (編), Handbook of Electrostatics, pp. 732-776, オーム社, 1981.
- [5] Y. Tabata (監修), “靜電氣の 現象と 災害·障害 防止技術”, 日本 勞動省 産業安全研究所 論文, 1996.
- [6] T. Kodama, 産業における 靜電氣 災害·障害の 防止, pp. 5-11, OHM誌 10月 別冊, オーム社, 1995.
- [7] National Fire Protection Association, NFPA 77: Recommended Practice on Static Electricity, 1988.
- [8] National Fire Protection Association, NFPA 53M: Manual on Fire Hazards in Oxygen-Enriched Atmospheres, 1990.

- [9] British Standards Institution, BS 5958: Code of Practice for Control of Undesirable Static Electricity, Part 1, 1980.
- [10] British Standards Institution, BS 5958: Code of Practice for Control of Undesirable Static Electricity, Part 2, 1983.
- [11] マグロウヒル社, 静電気 障・災害 対策 ハンドブック, 1997.
- [12] 日本 高分子學會編, 静電気 ハンドブック, 1978.
- [13] 秋田一雄, “最小發火エネルギーと火消炎距離”, 安全工學, Vol. 7, No. 4, 1968.
- [14] 春日電機株式會社, 放電着火試験装置 SP-2型 仕様書, 1995年 12月.
- [15] IEC-DIS-31H(CO)17, Electrical Apparatus for Use in the Presence of Combustible Dust - Part 2.

可燃性 混合物質의 最小 點火 Energy에 미치는
靜電氣의 影響에 관한 研究 (I)
(기전연 96-4-4)

發行日 : 1996. 12. 31.

發行人 : 院 長 이 한 훈

著 者 : 機電安全研究室長 李 寬 珩

發行處 : 韓國産業安全公團 産業安全研究院

住 所 : 仁川廣域市 富平區 九山洞 34-4

電 話 : (032) 510-0842

F A X : (032) 518-6483

<非賣品>