

靜電氣에 의한 火災·爆發 災害의 豫防

1994. 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 귀하

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
수행한 “靜電氣에 의한 火災·爆發 災害의 豫防을 위한 研究”의 最終
報告書로 제출합니다.

1994년 12월 31일

主管 研究部署: 産業安全研究院
機械電氣研究室

研究遂行者: 室長 李寬珩

序 文

지난 12월 7일에 서울 아현동 都市가스 供給基地에서 발생했던 火災·爆發 事故는 우리에게 火災·爆發이 얼마나 끔직한 災殃을 초래하는지를 여실히 보여주고 있습니다. 이러한 事故는 최근 들어 그 發生頻度가 점점 높아져 가고 있으며, 더욱 심각한 것은 이러한 事故의 危險이 우리 주변 곳곳에 散在하여 있다는 사실입니다. 우리 눈에 잘 띄지 않아 흔히 看過되고 있는 靜電氣도 큰 災殃을 가져오는 火災·爆發을 일으킬 수 있는 한 原因을 제공하고 있습니다. 이러한 점에서 本「靜電氣에 의한 火災·爆發 災害의 豫防」을 위한 研究報告書의 出刊은 매우 時宜適切한 일이라고 생각합니다.

작년초부터 우리 研究院에서 靜電氣 관련 研究를 시작하여 一次年度 研究結果로서 靜電氣의 發生現象, 防護方法 및 除電方法 등에 대한 基本的인 事項들에 대하여 調査 分析한 研究報告書를 작년말에 이미 刊行한 바 있습니다. 이 報告書는 93年度 報告書에 이어 石油化學工場이나 纖維工場 등 靜電氣로 인한 火災·爆發 災害가 憂慮되는 事業場에 종사하는 勤勞者 여러분 특히 安全管理者들의 技術指針書로, 그리고 우리 公團의 敎育院과 各 指導院에서 敎育 및 技術指導 資料로 活用될 수 있으리라 믿습니다. 비록 未盡한 部分이 많더라도 아무쪼록 産業現場에서 요긴하게 活用되어 靜電氣로 인한 障·災害를 豫防하는데 조금이나마 寄與할 수 있게 되기를 빌어 마지 않습니다.

우리 研究院에서는 앞으로도 靜電氣의 障·災害에 관한 研究를 보다 深度있고 內實있게 遂行하여 나갈 計劃입니다. 이 分野에 관심을 갖고 계신 모든 분들의 持續的이고 아낌없는 聲援과 指導 鞭撻을 바랍니다.

1994년 12월 31일

韓國産業安全公團

産業安全研究院長

목 차

1. 머리말	1
2. 點火 爆發의 要因	4
2.1 一般 事項	4
2.2 爆發性 混合氣體	5
2.3 最小點火 Energy	18
3. 點火 爆發의 Mechanism 및 現象	28
3.1 爆發 Mechanism	28
3.2 爆發 現象	34
4. 靜電氣 放電과 點火	43
4.1 靜電氣放電의 特性	43
4.2 靜電氣放電에 의한 可燃性 混合氣體의 點火 ..	49
4.3 點火性 放電의 推定	59
5. 火災·爆發과 관련된 靜電氣 帶電	79
5.1 導體의 帶電	79
5.2 人體의 帶電	84

5.3 固體의 帶電	87
5.4 粉體의 帶電	94
5.5 液體의 帶電	98
6. 靜電氣 관련 特性實驗 및 點火·爆發 實驗 裝置 設置	107
6.1 靜電氣 相关 特性實驗을 위한 實驗裝置	107
6.2 實驗 實施	113
6.3 實驗結果 및 考察	116
7. 靜電氣로 인한 火災·爆發의 防止對策	124
7.1 點火 爆發의 防止條件	124
7.2 爆發性 混合氣體의 生成防止	125
7.3 點火性 放電의 發生防止	136
8. 맺음말	145
參考文獻	148

1. 머리말

靜電氣 災害豫防에 관한 包括的인 事項 즉 靜電氣의 發生 現象, 靜電氣로 因한 障·災害 現況, 일반적인 防護方法 등에 대하여는 지난 해에 다루어 그 結果를 研究報告書^[1]로 이미 發刊한 바 있다. 금년에는 研究 範圍를 좁게 限定하여 靜電氣에 의한 火災·爆發 災害에 대해서 좀 더 상세히 다뤄 보고자 하였다. 靜電氣는 日常生活에서 우리가 흔히 경험하고 있는 自然現象중의 하나이지만 帶電된 靜電氣가 放電될 때 나오는 Energy는 狀況에 따라 우리에게 엄청난 被害를 가져올 수 있다. 그중 대표적인 것이 靜電氣의 放電 Energy에 의한 火災·爆發 災害이다.

工場내에서 靜電氣로 인한 被害는 적절히 대처하지 않을 경우 여러 가지 형태의 産業災害와 生産性の 低下 등 수없이 많다. 다양한 原因으로 蓄積된 靜電氣가 放電할 (Electrostatic Discharge; ESD) 때 發生하는 電流는 高密度 集積回路 (IC)와 같은 銳敏한 半導體 素子들을 破壞시키고 Computer와 같은, 수많은 IC Chip들을 內藏한 機器들의 誤動作을 誘發하고 있다. 靜電氣는 또한 먼지의 吸引 付着과 같이 物體 表面을 汚染시켜 IC와 같이 製造工程에서 엄격한 Clean Room 作業을 요하는 製品의 不良率을 增大시키고 品質低下를 가져오는 등 生産障害 야기와 作業能率을 低下시킬 수가 있다.

人體 등에 帶電된 靜電氣가 人體를 통하여 放電할 때는 帶電電位가 높은 경우 人體가 電擊을 받아 痛症을 느끼게 되고, 高所 作業者나 危險物 運搬者의 경우는 이러한 電擊으로 말미암아 몸의 균형을 잃어 추락하거나 넘어져서 2차 災害를 당할 우려도 있다.

그러나 무엇보다도 靜電氣에 의한 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 惹起할 수 있다.

이와 같이, 靜電氣는 産業現場이나 우리의 日常生活에서 흔히 發生하여 크게는 重大 産業災害의 源因이 되고, 작게는 日常生活의 不便을 가져오고 있다. 특히, 事業場에서 靜電氣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할 수가 있다.

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 複雑하게 하여 이로 인한 障·災害의 豫防을 더욱 어렵게 하고 있다.

人體에 蓄積되는 靜電氣는 보통의 경우 단지 귀찮은 일에 불과할 수 있다. 그러나 특별한 狀況에서는 심각한 災殃이 될 수가 있다. 예를 들어 爆發性 混合氣體가 存在하는 危險地域이나 爆發性物質을 취급하는 事業場에서 人體에 帶電된 靜電氣가 放電될 경우 큰 火災·爆發 事故를 일으킬 수 있다.

이와 같이 靜電氣에 의한 여러 가지 災害가 끊임없이 발생하고 있는 것은 우리가 눈에 보이지 않는 靜電氣에 대한 이해가 부족하고 그 심각성에의 認識이 缺如된 때문이라고 생각된다. 따라서 본 研究는 靜電氣로 인한 火災·爆發 災害의 豫防을 위하여 靜電氣로 인하여 火災·爆發이 일어나게 되는 要因과 Mechanism을 고찰하고, 이에 따라 여러 가지 가능한 防護對策을 講究하고자 遂行하였다. 防護對策을 수립하는데 있어 무엇보다도 중요한 것은 可燃

性物質의 火災·爆發이 일어나는 條件들을 파악하여 이 조건들이 동시에 充足되지 않도록 하는 일이므로 본 연구에서도 이에 主안점을 두어 다뤄 보고자 하였다.

이 보고서의 構成을 概略적으로 살펴보면 다음과 같다. 우선 제2章에서는 點火 爆發의 여러 가지 要因들에 대하여 살펴 보았고, 제3章에서는 點火 爆發의 Mechanism 및 現象을 考察하였다. 제4章에서는 靜電氣의 放電과 이에 의한 爆發性 混合氣體의 點火에 대해서 알아보았다. 제5章에서는 火災·爆發과 밀접한 관련이 있는 人體와 여러 가지 物體의 帶電에 대하여 분석하였다. 제6章에서는 靜電氣와 관련된 固體材料의 帶電特性 등을 實驗을 통하여 파악하였고, 직접 考案하여 설치한 靜電氣放電에 의한 爆發性 混合氣體의 爆發實驗裝置에 대하여 記述하였다. 마지막으로 제7章에서는 靜電氣로 인한 火災·爆發의 防止를 위한 諸般 對策들에 대하여 記述하였고, 향후 우리가 持續적으로 推進하여야 할 課題를 提示하면서 본 研究의 結論을 맺고자 하였다.

2. 點火 爆發의 要因

2.1 一般事項

靜電氣가 帶電되어 있는 物體가 어떠한 原因으로 放電될 경우 이때 발생 하는 Energy는 주변에 있는 可燃性物質의 點火源 역할을 하여 火災·爆發을 誘發한다.

産業의 발달에 따라 量産되거나 새로 개발되고 있는 高分子 化合物은 靜電氣의 發生을 매우 용이하게 하여 이러한 火災·爆發 災害의 危險性은 날로 증대하고 있다. 물론 先進國에서는 이에 대처한 研究開發도 활발히 이루어지고 있어 靜電氣에 의한 火災·爆發 災害는 차츰 감소하고 있다.

靜電氣의 影響으로 일어날 수 있는 火災·爆發은 일반적으로 다음과 같은 3가지 條件이 맞아 떨어질 때 일어난다.

- ① 可燃性(爆發性) 混合物 (Explosive Mixture)이 존재하고 그 混合濃度가 爆發 (燃燒) 限界내에 있다.
- ② 帶電物體 (보통 接地가 되지 않은, 즉 絶緣되어 있는 不導體)가 존재하고, 충분히 많은 靜電氣 電荷가 蓄積되어 있다.
- ③ 그 장소에 존재하는 可燃性物質의 最小點火 (Minimum Ignition) Energy보다 큰 放電 Energy를 放出하는 靜電氣放電이 일어난다.

따라서 적절한 防護對策을 강구하여 위의 條件들 가운데 적어도 한가지만 확실하게 제거하여 이 條件들이 같은 장소에서 동시에 존재하지 않게 하면 火災·爆發은 방지될 수 있다.

2.2 爆發性 混合氣體

燃燒過程中 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.

2.2.1 生成條件 및 限界濃度

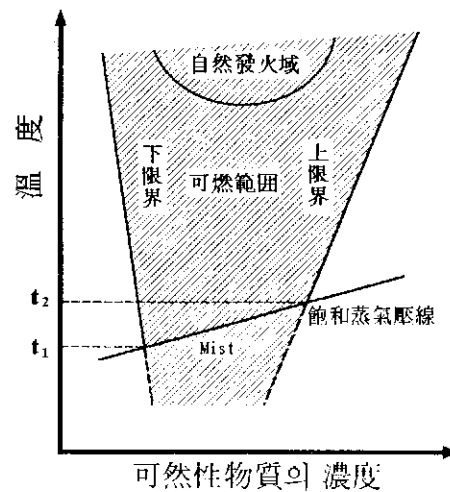


그림 2.1 可燃範圍와 溫도의 關係

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

계 등으로 부른다. 그림 2.1은 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 濃度は 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.

Gas나 粉塵 형태의 可燃性物質의 空氣중 混合物는 그 成分比가 燃燒下限界 및 燃燒上限界라고 불리는 두 限界 내에 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 입장에서 혼합된 정도를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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 2 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라고 하고, 이 範圍안에 있는 어떤 混合體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들도 있다.

표 2.1 可燃性物質 (液體 및 Gas)의 引火點 및 燃燒範圍

可燃性物質 (Combustible)	引火点 (°C)	燃燒 範圍 (Vol. %)			
		空氣中		酸素中	
		下限界	上限界	下限界	上限界
【炭化水素】					
Methane	Gas	5.0	15	5.1	61
Ethane	Gas	3.0	12.4	3.0	66
n-Butane	-60	1.8	8.4	1.8	49
n-Hexane	-3.9	1.2	7.4	1.2	52
n-Octane	13.3	0.8	6.5	≤ 0.8	-
Ethylene	Gas	2.7	36	2.9	80
Propylene	Gas	2.4	11	2.1	53
Acetylene	Gas	2.5	100	≤ 2.5	100
Gasoline	-45.5	1.3	7.1	≤ 1.3	-
Kerosene	37.8	0.7	5	0.7	-
【麻醉劑】					
Cyclopropane	Gas	2.4	10.4	2.5	60
Ethyl Ether	-28.9	1.9	36	2.0	82
Vinyl Ether	- 30	1.7	27	1.8	85
Ethylene	Gas	2.7	36	2.9	80
Ethyl Chloride	- 50	4.0	14.8	4.0	67
【溶劑】					
Methyl Alcohol	12.2	6.7	36	≤ 6.7	93
Ethyl Alcohol	12.8	3.3	19	≤ 3.3	-
Ethyl Acetate	-4.4	2.2	11	≤ 2.2	60
Acetone	-17.8	2.6	13	≤ 2.6	30
Benzene	-11.1	1.3	7.9	≤ 1.3	-
Naptha	37.8	1.0	6	≤ 1.0	-
Toluene	4.4	1.2	7.1	≤ 1.2	52
Butyl Chloride	-6.7	1.8	10	1.7	57
Trichloroethane	-	6.3	13	4.0	91
Trichloroethylene	32.2	10.5	41	5.5	
【기타 物質】					
Acetaldehyde	-27.2	4.0	60	4.0	-
Ammonia	Gas	15.0	28	15.0	79
Aniline	75.6	1.2	8.3	≤ 1.2	-
Carbon Monoxide	Gas	12.5	74	≤ 12.5	94
Carbon Disulfide	-30	1.3	50	≤ 1.3	-
Ethylene Oxide	<17.8	3.6	100	≤ 3.6	100
Hydrogen	Gas	4.0	75	4.0	95
Hydrogen Sulfide	Gas	4.0	44	≤ 4.0	-

※ 註: NFPA 53M "Manual on Fire Hazards in Oxygen-Enriched Atmospheres" (1990)에서 拔萃 引用.

주요 可燃性物質 (Gas 및 液體)의 爆發範圍 (燃燒範圍)는 표 2.1과 같다. Gas 또는 蒸氣와 空氣의 混合氣體의 燃燒範圍는 周邊溫도의 上昇에 따라 더 확장된다. 즉, 周邊溫度가 上昇함에 따라 常溫때와 비교하여 燃燒下限界는 더 낮아지고 燃燒上限界는 더 올라간다. 이는 混合氣體의 可燃性이 溫도의 上昇에 따라 增大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 제거함으로써 豫防할 수 있다. 이것은 可燃性混合物의 濃度を 낮추기 위하여 외부공기와 換氣를 하거나, 不活性氣體 (Inert Gas)를 첨가하는 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, 燃燒速度, 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.

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.

2.2.2 限界濃度の推算

可燃限界의 Mechanism은 對流 및 浮力에 의한 輸送現象과 熱의效果를 고려하여 여러 가지가 試驗되고 있으나 아직 통일된 定說은 확립하지 못하고 있다. 그러나 可燃限界濃度を 推定하는 方法으로서 현재 가장 많이 사용되고 있는 것에 대하여 기술하고자 한다.

Burgess-Wheeler의 法則에 의하여 다음 식을 얻을 수 있다.

$$L \cdot Q = \text{一定}$$

또는

$$l \cdot q = \text{一定}$$

여기서, L (vol%) 및 l (g/cm³)는 可燃範圍에 대한 下限界濃度이고, Q (kcal/mol) 및 q (kcal/g)은 각각 分子燃燒熱과 單位質量當 燃燒熱이다. 空氣 중에서 炭化水素類는 $L \cdot Q \approx 11$ kcal/mol 또는 $l \cdot q \approx 500$ kcal/m³이 되어, 下限界濃度の 可燃性 混合氣體 1 mol 또는 1 m³이 갖는 燃燒熱은 일정하다. 이 관계로부터 可燃性物質의 燃燒熱을 알면 下限界濃度を 구할 수 있다.

常溫에 대한 空氣중에서의 下限界濃度 l_{25} (mg/l)은 各種 炭化水素系 可燃性 液體 및 氣體에 대해서 實測值의 統計的 比較結果 다음과 같이 일정함을 알 수 있다.

$$l_{25} = 48 \pm 4 \text{ (mg/l)}$$

단, 例外的으로 Methane, Ethane 및 Propane의 경우는 각각 38, 41 및 42이고, Etylene 및 Acetylene의 경우는 35 및 29가 된다. 위 식은 揮發油 (Gasoline), Zet 燃料 등 高級炭化水素의 混合物의 下限界濃度を 추정할 경우

에 편리하다.

常溫에서 空氣中에서의 下限界濃度 L_{25} (vol.%)와 化學當量濃度 S_1 (vol.%)과의 관계에 대하여 알아보면, 炭化水素系 物質의 경우는 다음과 같다.

$$\frac{L_{25}}{S_1} = 0.54 \pm 0.05$$

단, 例外的으로 水素: 0.14, Etylene: 0.41, Acetylene: 0.32, 및 Metyl-Acetylene: 0.34이다. 또한, 硫黃化合物 및 窒素化合物에서는 통일된 값이 없다.

上限界濃度 U_{25} (vol.%)와 下限界濃度 L_{25} (vol.%)와의 관계는 Paraffin系 炭化水素의 경우는 다음과 같이 주어진다.

$$U_{25} = 6.5\sqrt{L_{25}} = 4.8\sqrt{S_1}$$

可燃性物質이 多成分으로 되어 있는 경우에는 可燃範圍의 下限界濃度 L (vol.%) 및 上限界濃度 U (vol.%)를 다음과 같은 Le Chatelier의 法則을 이용하여 구할 수 있다.

$$L = \frac{100}{\sum_{i=1}^n (x_i/L_i)}$$

및

$$U = \frac{100}{\sum_{i=1}^n (x_i/U_i)}$$

여기서, $\sum_{i=1}^n x_i = 100$ 이고, x_i (vol.%)는 n 成分으로 된 可燃性物質의 i 번째

成分의 成分比이고, L_i (vol.%) 및 U_i (vol.%)는 각각 i 번째 成分 單獨의 可燃性範圍의 下限界濃度 및 上限界濃度이다. 이 Le Chatelier의 法則은 同系 또는 同族化合物로 되어 있는 可燃性物質에는 實測値와 일치가 잘 되나 그 외의 경우나 冷炎이 발생하는 領域에서는 적용되지 않는다.

2.2.3 溫度 및 壓力의 影響

可燃範圍는 일반적으로 溫度의 상승과 더불어 넓어져서 200~300 °C까지는 대체적으로 直線關係가 유지된다. 그러나 溫度가 더 상승하여 自然發火溫度에 가까워지다 火焰이 傳播하기 전에 混合氣體의 成分 및 狀態가 변화됨으로 測定値가 다르게 나타나고 있다. 下限界濃度を 溫度 依存性を 고려하여 수정된 Burgess-Wheeler의 法則에 의하여 구하면 다음과 같다.

$$\frac{L_t}{L_{25}} = 1 - 7.21 \times 10^{-4} (t - 25)$$

여기서, L_t 및 L_{25} 는 溫度 t °C 및 25 °C에서의 下限界濃度이다. 이 식은 Paraffin系, Olefine系, Acetylene系, 芳香族 및 Alcohol類 炭化水素에 대해서는 實測値와 잘 일치한다.

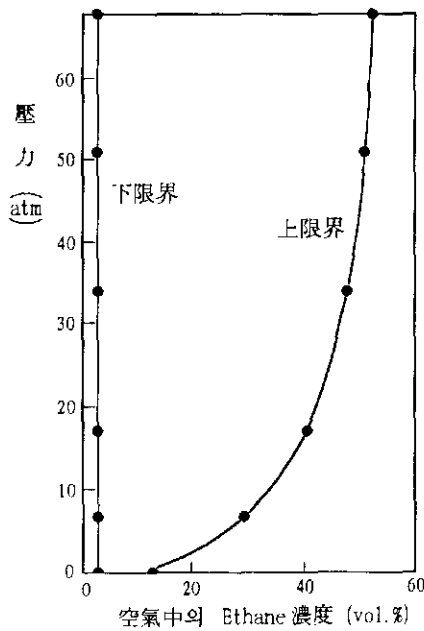
上限界濃도에 대해서도 下限界에서의 火焰溫度와 같다고 가정하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{U_t}{U_{25}} = 1 + 7.21 \times 10^{-4} (t - 25)$$

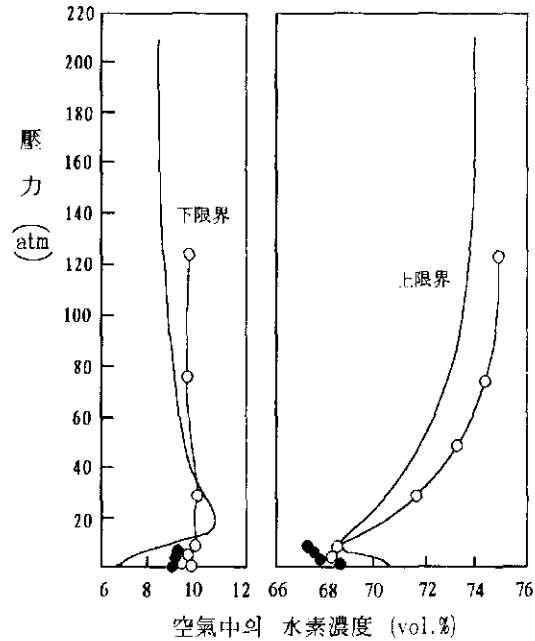
여기서, U_t 및 U_{25} 는 溫度 t °C 및 25 °C에서의 上限界濃度이다.

위 식들로부터 常溫 25 °C에서의 下限界 및 上限界 濃度を 알면 高溫에서

의 下限界 및 上限界 濃度を 각각 구할 수 있다.



(a) Ethane-空氣系



(b) 水素-空氣系

그림 2.3 可燃範圍의 壓力 依存性

可燃範圍의 壓力 依存성에 대해서는 그림 2.3 (a)에 例示된 Metane 의 경우와 같이 일반적으로 壓力이 높아지면 넓어지는 경향이 있다. 특히, 上限界의 擴張이 현저하다. 그러나, 그림 2.3 (b)에 있는 水素의 例와 같이 壓力이 상승할 때 처음에는 오히려 좁아지다가 어느 정도 지난 후부터 넓어지는可燃性物質이 적지 않다. 이 可燃範圍가 최소로 좁아지는 壓力은 空氣중에서 下限界는 水素, Metane, Etylene 및 一酸化炭素의 경우 각각 20, 30, 20 및 175 atm이고, 上限界는 水素, Metane 및 一酸化炭素의 경우 각각 10, 20 및 120 atm이다. 다음에 可燃範圍의 低壓限界는 高壓限界에 비하여 實驗이 용이

하브로 비교적 잘 조사되고 있는데, 그림 2.4에 있는 예와 같이 거꾸로 매달린鐘모양을 하고 있어 수십 mmHg 이하의 壓力에서는 火焰의 傳播가 일어나지 않는 것이 일반적인 현상이다.

可燃範圍의 高壓限界에 대해서는 實測値가 거의 없고 그 數値도 變化가 심하여 信賴性이 작아 향후 研究의 對象으로 남아 있다. 단지, 壓力이 올라감에 따라 火焰의 傳播速度가 작아지고 斷熱火焰溫度가 낮아지며 不完全燃燒의 比率이 높아지는 것 등에서 高壓限界가 存在할 것으로 추측되고 있다.

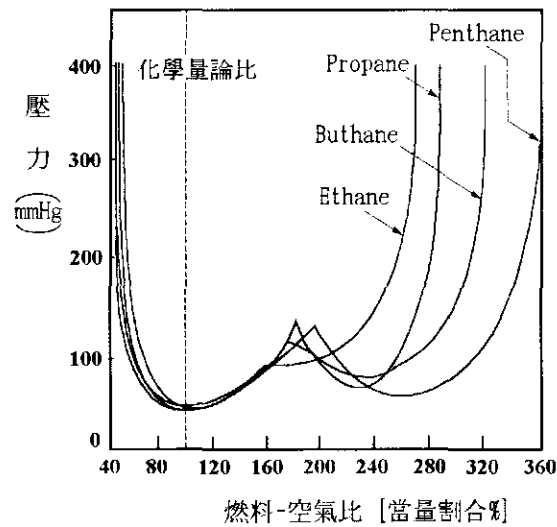


그림 2.4 可燃範圍의 壓力限界

2.2.4 添加物の 影響

可燃性の 氣體 또는 蒸氣와 酸素, 空氣, 鹽素, 窒素酸化物 등의 支燃性物質과의 混合氣體에 각종 不活性氣體를 첨가한 경우에 대해서 可燃範圍가 測定되고 있다. 그림 2.5의 Methane-空氣系에서 보여지듯이 不活性氣體의 첨가는

可燃範圍의 縮小效果를 가져온다. 縮小된 程度는 燃燒溫度에서의 不活性氣體의 熱容量 및 熱傳導率에 지배되고, 燃燒筒의 直徑이 작은 경우 (約 25 mmφ 以下)를 제외하고, $\text{CO}_2 > \text{H}_2\text{O} > \text{N}_2 > \text{He} > \text{Ar}$ 의 順序가 된다.

添加物에 의한 可燃範圍의 縮小效果를 나타내는 因子로서 消焰에 필요한 添加物의 最小濃度 즉 火焰이 持續될 수 있는 添加物의 最大濃度を 잡고 이것을 Peak值라고 부른다. 不活性氣體로서 二酸化炭素 및 窒素를 이용한 時の 各種 可燃性物質의 空氣중에서의 Peak值가 表 2.4에 나와 있다.

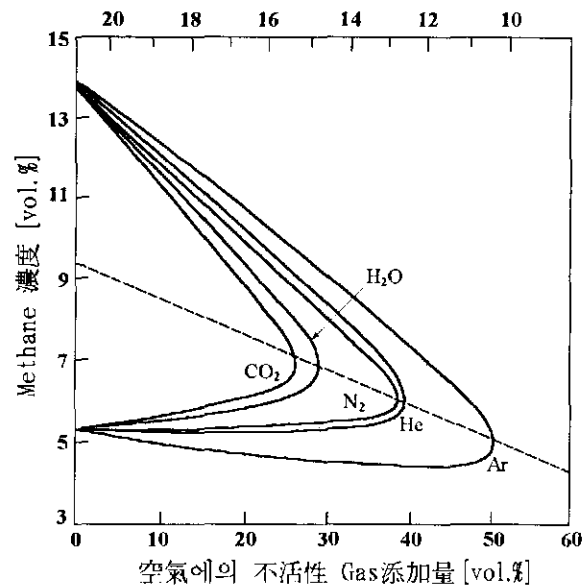


그림 2.5 Methane-空氣系에 대한 不活性氣體의 效果

添加物에 의한 可燃範圍의 縮小效果를 나타내는 因子로서 또한 安全 最大 酸素濃도가 있다. 表 2.5는 各種 可燃性物質의 安全 最大 酸素濃度を 나타낸다.

表 2.4 및 2.5로부터 揮發油 (Gasoline)과 같은 高級 炭化水素 混合物은 二

酸化炭素 및 窒素에 대하여 Peak値는 각각 $28 \pm 2 \%$ 및 $42 \pm 2 \%$ 이고, 安全最大酸素濃度는 각각 14.5 vol.% 및 12.1 vol.%인 것으로 추측하는 것이 가능하다.

표 2.4 각종 可燃性物質에 대한 CO₂ 및 N₂의 Peak値
(可燃性物質-空氣系, 常溫, 人氣壓)

可 燃 性 物 質	Peak値 (vol. %)	
	CO ₂ 濃度	N ₂ 濃度
Paraffin系 炭化水素		
Olefin系 炭化水素		
芳香族 炭化水素	} 28 ± 2	} 42 ± 2
脂環 炭化水素 (Cycroalkane)		
Ester類		
Alcohol類	31 ~ 32	45 ~ 46
Ether類	32 ~ 33	46 ~ 48
Ethane (C ₂ H ₆)	23	37
Ethylene (C ₂ H ₄)	39	49
Butadiene (C ₄ H ₆)	34	48
Acetylene (C ₂ H ₂)	53	63
二硫化炭素	58	72
硫化水素	30	-

Halogen化合物을 첨가하면 可燃範圍는 不活性氣體의 경우보다 효과적으로 축소된다. 일례로서 표 2.6은 Hexane-空氣系에 각종 Halogen炭化水素를 첨가한 때의 Peak値를 나타내고 있다. 二酸化炭素와 비교하여 매우 유효함을 알 수 있다. 이 때문에 Halogen化合物은 消火劑로서 利用되고 있고, 그 消火效力은 化合物중에 포함되는 Halogen에 대해서 $I > Br \gg Cl > F$ 의 順으로 알려져 있다. 可燃性物質에 대한 添加物의 영향에 대한 개개 物質에 관한 效果는 다른 文獻에 자세히 나와 있다.

표 2.5 각종 可燃性物質에 대한 CO₂ 및 N₂에 의한 安全 最大 酸素濃度
(可燃性物質-空氣系, 常溫, 大氣壓)

可 燃 性 物 質	Peak值 (vol. %)	
	CO ₂ 濃度	N ₂ 濃度
水素	5.9	5.0
一酸化炭素	5.9	5.6
Methane (CH ₄)	14.6	12.1
Ethane (C ₂ H ₆)	13.4	11.0
Propane (C ₃ H ₈)	14.3	11.4
Butane 및 高級炭化水素	14.5	12.1
Ethylene (C ₂ H ₄)	11.7	10.0
Propylene (C ₃ H ₆)	14.1	11.5
Cyclopropane (CH ₂ CH ₂ CH ₂)	13.9	11.7
Butadiene (C ₄ H ₆)	13.9	10.4
Benzene (C ₆ H ₆)	13.9	11.2
Metyl Alcohol	12.0	9.7
Etyl Alcohol (C ₂ H ₅ OH)	13.2	10.7
二硫化炭素	7.6	5.2
硫化水素	11.6	-

표 2.6 Hexane-空氣系에 대한 Halogen 炭化水素의 Peak值
(常溫, 大氣壓, 上方傳播)

Halogen化 炭化水素	Peak值 (vol.%)	
	Halogen化 炭化水素 濃度	Hexane 濃度
四佛化二臭化 Ethane (CF ₂ Br-CF ₂ Br)	3.2	3.4
二佛化二臭化 Methane (CF ₂ Br ₂)	3.6	3.2
요도化 Methyl (CH ₃ I)	4.7	1.9
三佛化一臭化 Methane (CF ₃ Br)	4.9	2.9
一臭化一鹽化 Methane (CH ₂ BrCl)	6.4	2.5
臭化 Methyl (CH ₃ Br)	7.1	2.1
四鹽化炭素 (CCl ₂)	9.7	3.2
二佛化二鹽化 Methane (CF ₂ Cl ₂)	13.5	3.6
三佛化三鹽化 Ethane (CF ₂ Cl-CFCl ₂)	14.4	4.1
二酸化炭素 (CO ₂)	29.0	2.3

2.2.5 粉塵爆發의 限界濃度

粉塵爆發의 下限界濃度는 粉塵의 粒度, 粒子表面의 化學的 活性, 粒子의 含水率, 周圍空間內 分散의 均一度, 周圍空間 氣體의 成分, 點火方式, 測定裝置의 모양 등 많은 因子에 의존한다. 이 때문에 計測이 어렵고, 特性値는 相對的인 觀點에서 이해되어져야 하며, 直接的인 試驗에 의하여 求해야 한다.

空氣中에 대한 爆發下限界濃度 l (mg/l)에 있어서 Polyethylene, Polypropylene 등의 炭化水素系 Plastic類의 粉塵에 대하여는 Burgess-Wheeler의 法則이 성립하여 $l = 45 \sim 50$ mg/l이 된다. 기타 粉塵에서는 下限界濃度는 $l = 20 \sim 60$ mg/l 上限界濃度는 $l = 2000 \sim 6000$ mg/l이다. 爆發의 危險性은 주변 霧圍氣 氣體의 酸素濃度の 影響을 강하게 받고, 不活性氣體 등의 稀釋에 의한 酸素濃度の 低下에 따라 爆發下限界濃도가 증대하고 酸素濃도가 어떤 限界 이하가 될 경우 爆發은 일어나지 않게 된다. 이 때의 酸素濃度を 限界 酸素濃度라고 하며, 爆發災害 防止對策을 수립하는데 있어 고려하여야 할 중요한 因子중의 하나이다. 霧圍氣 氣體를 水分으로 稀釋한 경우, 有機物 粉塵에서는 下限界濃도가 增大하여 爆發이 일어나기 어렵게 되지만, 金屬 粉塵에 대해서는 반드시 爆發이 억제된다고 볼 수 없다. 霧圍氣 氣體에 可燃性氣體 또는 可燃性液體의 蒸氣가 포함되어 있으면 粉塵 爆發의 下限界濃도가 低下하고 危險性이 커진다. 粉塵雲의 霧圍氣 氣體에 炭酸 Calcium, Silica Gel ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), 無機鹽, 岩粉 등의 不活性 粉塵을 混在시키는 것에 의하여 冷却效果, 浮遊抑制效果 등을 가져오며 이에 따라 爆發性을 低下시키는 것이 가능하다.

粉塵爆發의 傳播 Mechanism을 지배하는 熱을 授受할 때, 化學反應을 포함한 物理化學的 變化가 각각의 粒子 表面에서 일어나므로 平均 粒子直徑이

작은 粉塵은 比表面積이 크게 되어 爆發 下限界濃度는 작게 된다.

粉塵爆發의 下限界濃度を 포함한 特性値에 관하여 美國 鑛山局에서 오래 전부터 體系的인 研究가 실시되고 있으며, 金屬粉塵 314 種, Plastic 粉塵 314 種, 農産物, 化學藥品, 醫藥品 등에 대해서 爆發下限界濃度, 最小點火 Energy, 限界酸素濃度, 最大爆發壓力, 爆發壓力 上昇速度 등의 Data를 내오고 있다.

噴霧爆發 즉 可燃性液體가 미세한 液滴 (Mist)가 되어 煙霧質 (Aerosol 또는 Spray)로 空氣中에 분산되어 있을 때의 爆發性에 대해서 살펴보면, 概略적으로 粉塵爆發과 유사한 現象으로 취급할 수 있으나, Mist의 크기가 10 micron 이하에서는 氣體爆發의 特性과 유사한 경향을 갖고 있음이 확인되고 있다. 특히, 下限界濃度 및 不活性氣體에 의한 添加物效果는 Mist의 크기가 작아짐에 따라 氣體爆發現象과 매우 유사하게 된다.

2.3 最小 點火 Energy

2.3.1 靜電氣의 放電 Energy

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

$$E = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} QV$$

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.

2.3.2 最小 點火 Energy

靜電氣放電이 可燃性 混合氣體를 點火시킬 수 있는지의 여부는 可燃性 混

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의 函數로서 그림 2.6에서 보여지는 형태로 된다.

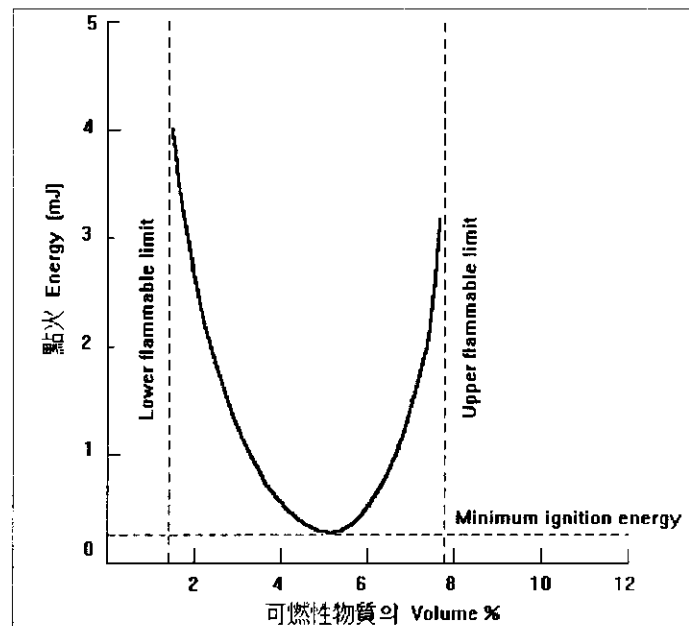


그림 2.6 空氣중 可燃性物質의 濃度와 點火 Energy

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 척도가 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 Energy라고 한다.

Ethane, Butane과 같은 飽和炭化水素 Gas나 증기는 공기와의 混合比가

최적일 때, 불꽃放電에 의한 放出 Energy가 0.25 mJ이면 點火되는 것으로 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 最小點火 Energy는 대략 0.01~1.0 mJ의 범위에 있고, Gas/酸素 混合體의 最小點火 Energy는 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 最小點火 Energy는 表 2.1에 나와 있다.

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

粉塵의 最小點火 Energy는 化學的 成分외에 粒子的 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 구성하고 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, 공기중의 酸素 濃度가 증가할수록 點火 Energy는 감소하여 爆發 危險性이 커지게 된다.

2.3.3 消焰距離

消焰距離는 爆發性 混合氣體로 채워진 容器를 좁은 通路로 연결된 2 部分

으로 隔離한 경우, 한 쪽에 있는 混合氣體를 點火한 후 火焰이 이 좁은 通路를 傳播하여 가서 다른 쪽의 混合氣體에 引火될 때에 있어서 引火가 가능한 最大의 좁은 通路의 길이를 말한다. 즉, 이 길이보다 길 경우 火焰은 傳播되지 못하여 다른 쪽의 混合氣體를 引火시키지 못한다.

最小點火 Energy는 Energy 供給源의 幾何學的 形狀 및 供給速度와 方法에 따라 크게 영향을 받고, 消焰距離는 좁은 通路部分의 幾何學的 形狀에 크게 의존하며 이 兩者間에는 밀접한 관계가 있다.

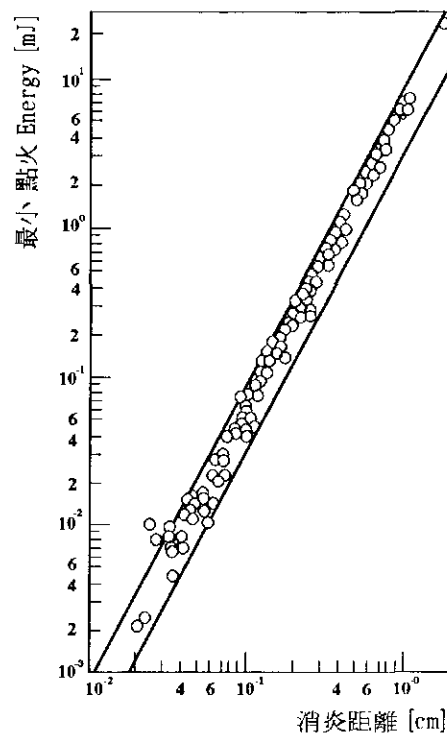


그림 2.7 最小點火 Energy $E_{\min}$ 와 消焰距離 d 의 관계 (炭化水素-空氣系)

그림 2.7는 각종 炭化水素類-空氣系에 대하여 平板 消焰距離와 最小點火 Energy와의 관계를 나타낸 것이다. 이 그림에서 보면, 最小點火 Energy $E_{\min}$

와 消焰距離 d 사이에는 다음과 같은 관계가 있음을 알 수 있다.

$$E_{\min} \propto d^2$$

이 식에서 可燃性 混合氣體가 點火되고 안정된 火焰傳播로 移行하기 위해서는 처음에 작은 點火容積이 存在하고 그 表面積이 關係하고 있는 듯이 보여진다. 이 最初의 火焰球가 갖는 全 Energy는 最小點火 Energy보다 약간 크고, 火焰의 傳播에 필요한 最小火焰直徑은 火焰의 消焰距離보다 약간 작다. 最小點火 Energy $E_{\min}$ 는 火焰傳播를 일으키는 臨界熱量으로 보여지는데, 이는 火焰面이 갖는 最小 Energy로 생각되어진다.

2.3.4 可燃性 氣體·蒸氣의 最小點火 Energy

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 시간이 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에 의한 影響

일반적으로 最小點火 Energy는 溫도의 上昇에 따라 현저하게 감소한다. 표 2.7은 몇 가지 物質들의 點火 Energy의 溫度變化를 나타내며, 이 수치들은 대체적으로 다음 式을 따른다.

$$E_{ig} = C e^{kT_0}$$

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.

最小點火 Energy의 壓力 依存性은 다음 식으로 나타내어진다.

$$E_{ig} \cdot P^b = \text{一定}$$

여기서 P 는 壓力(Power)이며, 그리고 대개의 경우, $b \cong 2$ 이다. 따라서, 壓力이 低下하면, 最小點火 Energy는 增加하지만 아주 낮은 壓力에서는 點火가 일어나지 않게 되며, 이 때의 壓力을 最小點火壓力이라 부른다. 最小點火壓力은 電極間隙, 燃燒容器的 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적으로 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에 의한 影響

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 관계가 특이한 모양을 갖는 Acetylene-空氣系에 대한 것이 그림 2.8에 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.

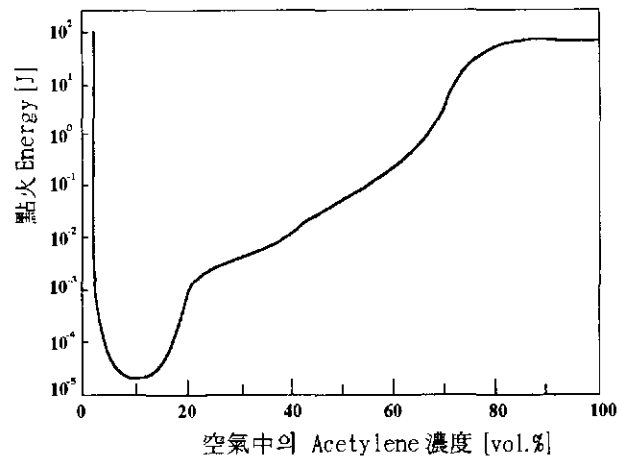


그림 2.8 Acetylene-空氣系의 點火 Energy

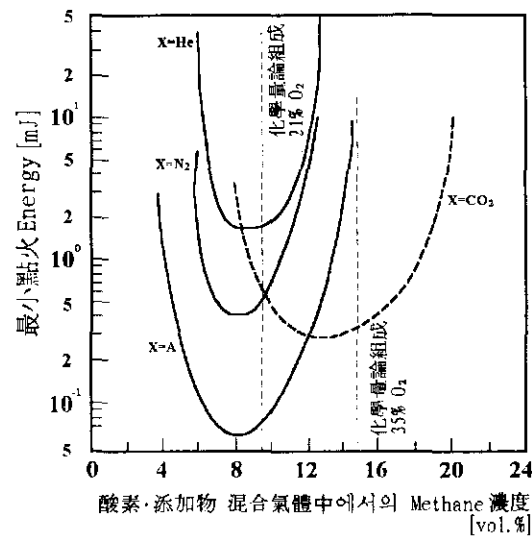


그림 2.9 Methane-酸素系의 最小點火 Energy의 添加物에 대한 效果

可燃性 混合氣體에 不活性氣體를 첨가하면 最小點火 Energy가 증가한다. 그림 2.9는 Metane-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의 效果를 갖고 있으나 可燃性物質에 따라 다를 수 있다.

(3) 기타 因子에 의한 影響

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 Alkane > Alkene > Alkyne의 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.

2.3.5 可燃性 粉塵의 最小點火 Energy

粉塵의 最小點火 Energy는 可燃性氣體에 비하여 100~1000 배나 크고 대체로 10~100 mJ이다. 粉塵爆發의 點火 Energy에 영향을 미치는 因子들로는 氣體에서와 마찬가지로 溫度, 壓力, 粉塵 濃度, 添加物 등을 들 수 있다. 이들 외에 추가적으로 粉塵粒子的 크기를 들 수 있는데, 粉塵粒子的 平均 直徑이 작아질수록 下限界濃度가 낮아지고 爆發壓力을 증가시켜 爆發性を 증대시키는 경향이 있다. 이에 따라 點火 Energy도 粉塵粒子的 平均直徑이 작아지면 비례하여 작아진다. 이는 比表面積의 증가에 기인하는 것으로서 같은 크기의 平均直徑을 가진 粉塵이더라도 粉塵粒子的 形狀에 따라 달라진다. 즉, 얇은 Flake 같은 것은 球型의 경우보다 點火 Energy가 낮다. 대표적인 可燃性粉塵의 最小點火 Energy에 대해서는 附錄에 예시되어 있다.

2.3.6 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.

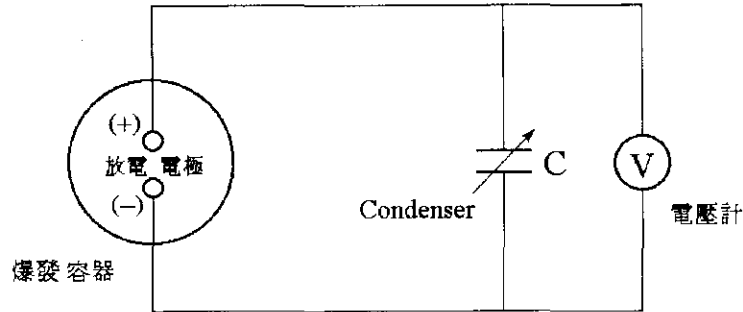


그림 2.10 最小點火 Energy의 測定法の 原理圖

그림 2.10은 測定法の 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 달 하면 放電이 일어나게 된다. 放電후의 電壓은 V_2 가 되는데, 이 때의 放電 Energy E 는 다음과 같이 주어진다.

$$E = \frac{1}{2} C (V_1^2 - V_2^2)$$

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 균일하게 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. 點火 爆發의 Mechanism 및 現象

3.1 爆發 Mechanism

可燃性混合物이 어떻게 發火되어 燃燒가 계속되는가에 대한 理論은 대체적으로 2가지로 집약되어지고 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.

3.1.1 熱爆發 理論

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의 속도 v_Q 는 다음과 같은 Arrhenius 式에 의하여 나타내어 질 수 있다.

$$v_Q = Q f(n) A e^{-\frac{E}{RT}} \quad (3-1)$$

여기서, $f(n)$ = 濃度에 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의 速度 v_{Q-}
는 다음 식과 같이 주어진다.

$$v_{Q-} = k (T - T_0) S \quad (3-2)$$

여기서, k = 熱傳達 係數이고, S = 反應器의 表面積이다.

式 (3-1) 및 (3-2)로 각각 표현되고 있는 發生熱量速度 v_{Q+} 및 放散熱量
速度 v_{Q-} 의 溫度 依存性を 그림으로 나타내면 그림 3.1과 같다. v_{Q+} 는 曲線
으로 나타나고, v_{Q-} 는 T 軸 切片이 反應容器的 溫度인 T_0^1 , T_0 및 T_0^2 에 따
라 결정되는 直線이다 ($T_0^1 < T_0 < T_0^2$). 먼저 $T_0^1 < T_0$ 인 때에는 초기에 發
生熱量速度 v_{Q+} 가 放散熱量速度 v_{Q-} 보다 크므로 反應系의 온도는 器壁의
온도보다 높게 된다. 그 후 反應系의 온도가 T_1' 보다 더 올라 가게 되더라도
외부로 빠져 나가는 放散量이 發熱量보다 많으므로 온도는 T_1' 으로 다시 내
려가 反應系는 爆發을 일으키지 않고 器壁의 온도보다 약간 높은 T_1' 에서
平衡을 유지하게 된다.

$T_0^2 > T_0$ 인 때에는 發生熱量速度 v_{Q+} 가 모든 溫度 範圍에서 v_{Q-} 보다 크
므로 反應系에 熱이 축적되어 온도가 높아지게 되고, 이에 따라 反應速度는
더욱 빨라져서 爆發로 이어지게 된다 (自然爆發).

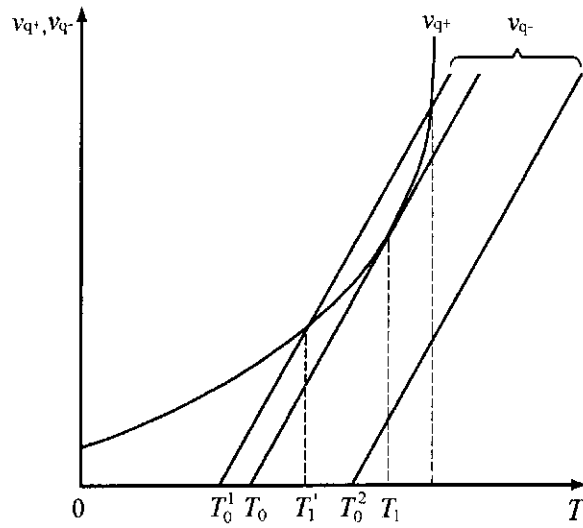


그림 3.1 發生熱量速度 v_{q+} 및 放散熱量速度 v_{q-} 의 溫度 依存性

器壁의 溫度가 T_0 인 때에는 曲線 v_{q+} 와 直線 v_{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 $v_{q+} = v_{q-}$ 및 $dv_{q+}/dT = dv_{q-}/dT$ 로부터 다음 式들을 얻을 수 있다.

$$k(T_1 - T_0)S = Q f(n) A e^{-\frac{E}{RT_1}} \quad (3-3)$$

$$kS = \frac{Q f(n) A E}{RT_1^2} e^{-\frac{E}{RT_1}} \quad (3-4)$$

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

$$\begin{aligned} f(n) &= \frac{kSRT_0^2}{EQA} e^{-\frac{E}{RT_0}} \\ &= BT_0^2 c^{-\frac{E}{RT_0}} \end{aligned} \quad (3-5)$$

또는

$$\ln \left[\frac{f(n)}{T_0^2} \right] = \frac{E}{RT_0} + \ln B \quad (3-6)$$

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.

$$\ln \left[\frac{p^i}{T_0^2} \right] = \frac{E}{RT_0} + \ln B' \quad (3-7)$$

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 反應物の 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.

3.1.2 連鎖分枝爆發 理論

連鎖分枝反應은 反應系내에서 反應성이 강한 화학물질이 自己觸媒의으로 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 반응으로서, 2 가지의 Free Radical에 의한 再結合이 Free Radical과 分子의 반응에 의하여 안정된 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, 硫化水素, 燐化水素, 二硫化炭素, 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 대개의 要素反應 Mechanism이 완전하게 설명되지 못하고 있다.

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 3.2에 나타나 있는 바와 같이 제1단계, 제2단계, 및 제3단계가 존재한다. 이는 다음과 같은 要素反應으로 설명될 수 있다.

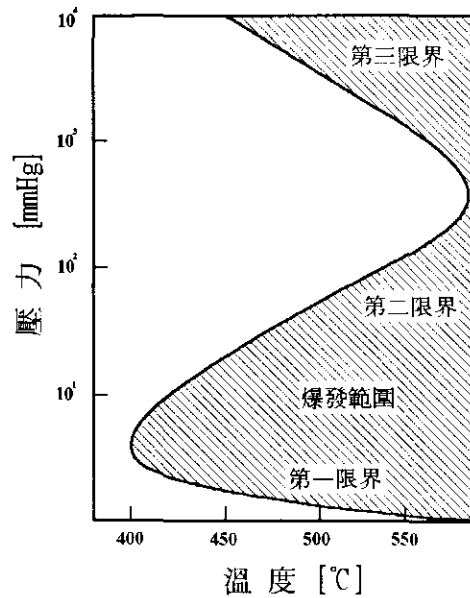


그림 3.2 混合氣體의 爆發範圍

- (1) $\text{OH} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{H} + 14.8 \text{ kcal}$ (連鎖成長反應)
- (2) $\text{H} + \text{O}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{O} - 16.7 \text{ kcal}$ } (連鎖分枝反應)
- (3) $\text{O} + \text{H}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{H} - 1.9 \text{ kcal}$ }
- (4) $\text{H} + \text{O}_2 + \text{M} \rightarrow \text{HO}_2 + \text{M} + 47.0 \text{ kcal}$ (均一連鎖停止反應)
- (5) $\text{H} \rightarrow \frac{1}{2} \text{H}_2 \text{ (器壁)}$ } (不均一連鎖停止反應)
- (6) $\text{OH} \rightarrow \text{消滅 (器壁)}$ }
- (7) $\text{HO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H} - 15.0 \text{ kcal}$ } (弱活性種 H_2O 의 連鎖成長反應)
- (8) $\text{HO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2 + \text{OH} - 30.5 \text{ kcal}$ }
- (9) $\text{HO}_2 \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \text{ (器壁)} \\ \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O} + \frac{3}{4} \text{O}_2 \text{ (器壁)} \end{array} \right\}$ (弱活性種 HO_2 의 不均一停止反應)

第一限界는 反應容器 表面의 性質에 영향을 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 競合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. 第三限界는 熱爆發과 連鎖爆發 중 어느 것이 주가 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 계속하든가 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 爆發 現象

3.2.1 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 3.3과 같은 過程을 거쳐 일어난다.

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 緩慢燃燒狀態가 된

다. 외부에서 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 燃燒는 보통 여기서 종료되어 버린다.

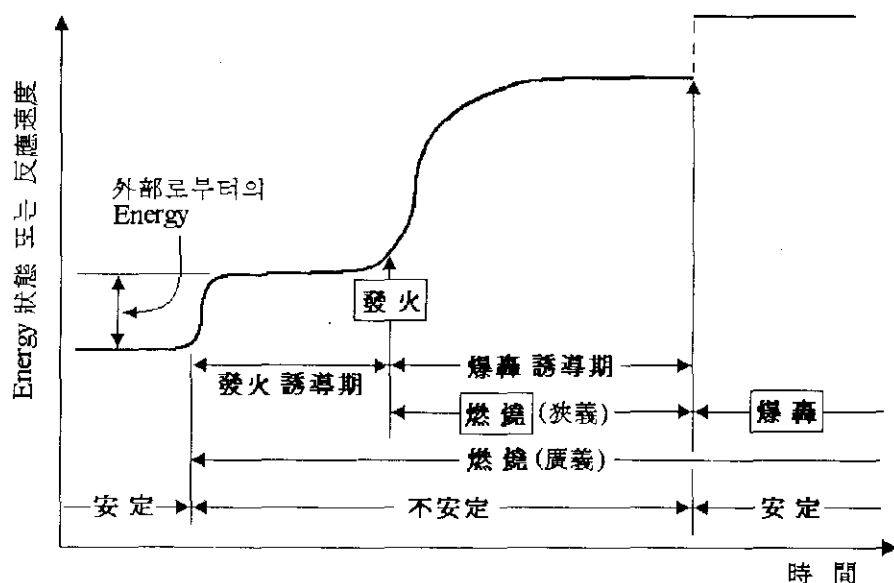


그림 3.3 可燃性物質의 爆發進行過程

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

3.2.2 高速 燃燒의 形態

燃燒는 다양한 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 불꽃속에서 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 혼합물의 燃燒를 들 수 있으며, 이의 燃燒速度는 20~25 m/s이다.

(3) 爆轟 (Detonation)

爆發(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.

3.2.3 高速 燃燒의 特徵

表 3.1은 爆燃 및 爆轟시 나타나는 壓力, 溫度, 密度 등의 현저한 차이점을 보여주고 있다. 反應을 동반하는 1次元의 定常氣流에 대한 基本式들은 다음과 같다.

$$\rho_1 v_1 = \rho_2 v_2 : \quad \text{質量 保存의 法則} \quad (3-8)$$

$$P_1 + \rho_1 v_1^2 = P_2 + \rho_2 v_2^2 : \quad \text{運動量 保存의 法則} \quad (3-9)$$

$$H_1 + \frac{v_1^2}{2} = H_2 + \frac{v_2^2}{2} : \quad \text{Energy 保存의 法則} \quad (3-10)$$

여기서, ρ : 密度 ($\rho = 1/V$), v : 質量速度, P : 壓力, H : Enthalpy
($H = E + P/\rho$), V : 比容積, E : 内部 Energy 등이다.

표 3.1 氣體의 爆燃과 爆發에 따른 物理現象의 變化

比	爆燃 (Deflagration)	爆轟 (Detonation)
v_2/v_s	0.001 ~ 0.03	5 ~ 10
v_1/v_2	4 ~ 16	0.4 ~ 0.7
P_1/P_2	0.98 ~ 1.976	13 ~ 55
T_1/T_2	4 ~ 16	8 ~ 21
ρ_1/ρ_2	0.06 ~ 0.25	1.4 ~ 2.6

註: v 는 火焰面에 대한 燃燒波의 速度, P 는 壓力, T 는 溫度, ρ 는 密度를 각각 나타내며, 아래添字 1은 燃燒氣體, 아래添字 2는 未燃燒氣體를 나타냄. v_s 는 未燃燒氣體내에서의 音速임.

이 方程式들을 壓力과 比容積을 사용하여 나타내면 다음과 같은 Rankin-Hugoniot 式을 얻는다.

$$H_2 - H_1 = \frac{1}{2}(P_2 - P_1)(V_1 + V_2) \quad (3-11)$$

여기서, 反應에 의하여 分子量이 變化하지 않는다고 하고 이 때 발생하는 熱量을 Q 라고 하면,

$$H_1 = c_p T_1 = \frac{\gamma}{\gamma-1} P_1 V_1 \quad (3-12)$$

$$H_2 = c_p T_2 - Q = \frac{\gamma}{\gamma-1} P_2 V_2 - Q \quad (3-13)$$

여기서, c_p 는 定壓比熱, γ 는 比熱比이다. 또한,

$$\frac{P_1}{\rho_1 T_1} = \frac{P_2}{\rho_2 T_2} \quad (\text{狀態 方程式}) \quad (3-14)$$

이므로, 式 (3-11)은 다음과 같이 된다.

$$\frac{\gamma}{\gamma-1} (P_2 V_2 - P_1 V_1) - Q = \frac{1}{2} (P_2 - P_1) (V_1 + V_2) \quad (3-15)$$

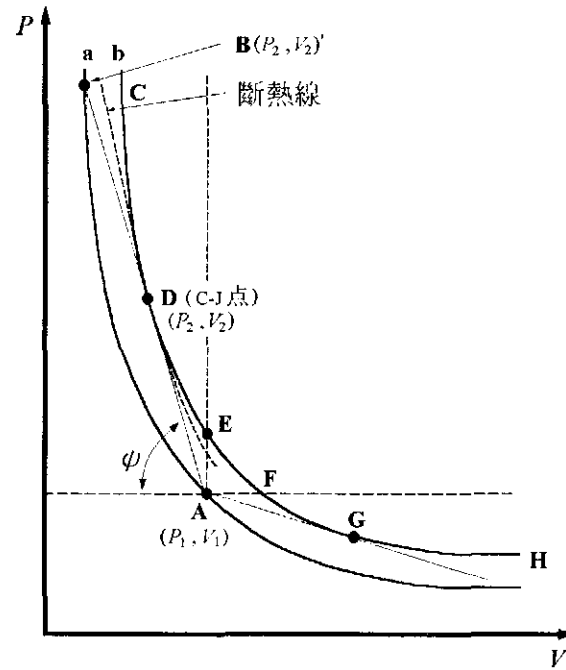


그림 3.5 Hugoniot 曲線

式 (3-15)에서 反應熱이 0인 경우 ($Q=0$)는 等溫變化 또는 斷熱變化로서 Hugoniot 變化 또는 衝擊斷熱 (Shock Adiabatic) 變化로서, 그림 3.5의 $P-V$ 曲線에서 最初狀態 (1)인 曲線 a 위의 點 $A(P_1, V_1)$ 에서 點 $B(P_2, V_2)'$ 으로의 變化를 가져온다. 同式에서 反應熱이 있는 경우 ($Q \neq 0$)는 曲線 a 위의 임의의 點 $A(P_1, V_1)$ 에서 供給熱量 Q 에 대한 最終狀態 (2)인 曲線 b 위의 點 $D(P_2, V_2)$ 로의 變化를 가져온다. 그림 3.5에서 상태 1과 2를 연결하는 直線은 Rayleigh Line이라고 불린다. X-軸과의 角度를 ψ 라고 하면, A點에서 曲線 EF部分으로의 變化는 $\tan \psi$ 의 값이 負가 되므로 실현되지 않는다. 質量速度는 質量 保存의 式과 運動量 保存의 式으로부터 다음 식과 같이 구해진다.

$$\frac{u_1}{V_1} = \frac{u_2}{V_2} = \sqrt{\frac{P_2 - P_1}{V_1 - V_2}} = \sqrt{\tan \psi} \quad (3-16)$$

상태 1에 대한 상태 2의 速度 즉, 粒子의 速度는 다음 식으로 주어진다.

$$v = u_1 - u_2 = (V_1 - V_2) \sqrt{\frac{P_2 - P_1}{V_1 - V_2}} = (V_1 - V_2) \sqrt{\tan \psi} \quad (3-17)$$

따라서, 曲線 EDC 部分으로의 變化는 $V_1 > V_2$ 이므로 $v_1 > v_2$ 이 되어 燃燒는 爆轟 (Detonation)이 된다. 한편, 曲線 FGH 部分으로의 變化는 $v_1 < v_2$ 이 되고 $v < 0$ 이므로 燃燒氣體는 波面の 進行方向과 반대로 進行하게 되어 爆燃 (Deflagration)이 된다.

C-J 點에서의 爆轟 (Detonation)의 速度 v_D 는 粒子速度 v_f 와 燃燒氣體의 音速 v_s 의 합으로 나타내어진다. 즉,

$$v_D = v_f + v_s \quad (3-18)$$

표 3.2는 대표적인可燃性氣體의爆轟의特性値들을 나타내고 있다.

표 3.2 可燃性氣體의爆轟 (Detonation)의特性
(初期條件: 1 atm, 常溫)

可燃性氣體	速 度 (m/s)	溫 度 (°K)	壓 力 (atm)
H ₂ (水素)-O ₂	2,840	3,600	18.8
H ₂ (水素)-空氣	1,900	2,950	15.6
CO (一酸化炭素)-O ₂	1,790	3,500	18.6
CH ₄ (Methane)-空氣	1,800	2,736	17.2
C ₃ H ₈ (Propane)-O ₂	2,500	-	-
C ₃ H ₈ (Propane)-空氣	1,800	2,823	18.3
C ₂ H ₂ (Acetylene)-O ₂	2,400	4,200	44.0
C ₂ H ₂ (Acetylene)-空氣	1,900	3,100	19.0
NH ₃ (Ammonia)-O ₂	2,400	-	-

* 可燃性氣體의 混合比는 化學量論 混合比 (Stoichiometric Mixture Ratio)임.

보통의 爆燃 (Deflagration)에서 爆轟 (Detonation)으로 轉移하면, 壓力과 傳播速度가 크게 되므로 破壞力도 현저하게 증가한다. 따라서 安全의 측면에서 爆發이 일어나는 경우에는 爆轟으로 발달하기 전에 火焰의 傳播를 저지해야 한다. 燃燒가 시작되고 나서 爆轟으로 轉移하기까지의 距離를 Detonation 誘導距離라고 하며, 다음과 같은 경우에 짧게 되고 爆轟으로 轉移되기 쉽다.

- ① 化學量論 組成 (Stoichiometric Composition)에 가깝고 燃燒熱이 크다.
- ② 化學反應速度가 크고 燃燒速度가 크다.
- ③ 壓力이 높다.
- ④ 溫度가 낮다.
- ⑤ 管의 直徑이 작다.

⑥ 管壁이 거칠다.

爆轟이 일어날 수 있는 可燃性 混合氣體의 濃度範圍 즉 爆轟 (Detonation) 範圍는 일반적으로 燃燒範圍내에 있는데, 管徑, 起爆 Energy 등의 조건에 크게 의존한다. 특히 管徑에 의한 變動이 커서, 管徑이 클 경우 爆轟의 範圍가 넓어지는 경향이 있다. 표 3.3은 主要 混合氣體의 爆轟範圍를 나타낸 것이다.

표 3.3 可燃性氣體의 爆轟 (Detonation) 範圍 (1 氣壓, 常溫)

可 燃 性 氣 體	下限界 濃度 (vol.%)	上限界 濃度 (vol.%)
H ₂ (水素)-O ₂	15.5	92.9
H ₂ (水素)-空氣	18.3	59
CO (一酸化炭素)-O ₂ (濕)	38	90
CO (一酸化炭素)-O ₂ (乾)	-	83
CH ₄ (Methane)-O ₂	8.25	55.8
C ₃ H ₈ (Propane)-O ₂	2.50	42.5
n-C ₄ H ₁₀ (Butane)-O ₂	2.05	37.95
i-C ₄ H ₁₀ (Butane)-O ₂	2.8	31
(CH ₃) ₄ CH ₂ (Neopentane)-O ₂	1.50	33.0
C ₃ H ₆ (Propylene)-O ₂	2.50	50.0
C ₂ H ₂ (Acetylene)-O ₂	3.5	92
C ₂ H ₂ (Acetylene)-空氣	4.2	50
C ₄ H ₁₀ O (Ether)-O ₂	2.6	>40
C ₄ H ₁₀ O (Ether)-空氣	2.8	4.5
C ₄ H ₄ O (Furan)-O ₂	2.6	55.5
(CN) ₂ (Cyanogen)-O ₂	0.14	76.0
(CH ₃) ₄ Si (Tetramethylsilane)-O ₂	1.8	48
NH ₃ (Ammonia)-O ₂	25.4	75

4. 靜電氣 放電과 點火

최근 産業現場이나 都市 住宅街에서 火災·爆發 事故가 자주 발생하고 있는데, 그 原因중에는 靜電氣의 放電 Energy에 의한 點火가 적지 않을 것으로 추측된다. 이 章에서는 帶電된 物體에서 靜電氣가 放電할 때 발생하는 Energy가 可燃性物質의 點火와 어떻게 관련되어 있는지에 대해서 고찰해보기로 한다.

4.1 靜電氣 放電의 特性

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 유효하게 소비되고 있어 點火 Energy의 限界量을 定量的으로 구하는 것으로는 불꽃放電이 가장 적합하다.

放電은 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 생각된다. 大氣중에 놓여진 平等電界의 경우, 印加電壓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.

4.1.1 불꽃 放電

氣體중에 놓여진 電極間에 電壓을 印加한 경우 放電空間에서 發光은 보이지 않는 정도의 電界에서도 電流가 흐르는데 이것을 暗流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 印加電壓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 방출시키는 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.

$$J = \frac{e N_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (4-1)$$

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 (4-1)에서 分母가 0에 매우 근접할 경우, 즉

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) \approx 1 \quad (4-2)$$

이면, 電流는 엄청나게 커져 불꽃放電으로 移行한다. 이 Model은 Townsend

에 의하여 제시된 것으로서, 氣壓이 낮고 Gap이 짧은 電界에서 電荷에 의한 電界의 뒤뜰름이 무시될 수 있는 경우에는 有效하다.

放電現象은 Paschen이 실험적으로 구한 Paschen의 法則에서 알 수 있듯이 불꽃 開始電壓은 pd , 즉 壓力과 電極間距離의 곱으로 나타낼 수 있다. 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 방출시키고 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 일어난데 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.

4.1.2 Corona 放電

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 있는데, 실험에는 그림 4.1에 圖示한 電極構造가 주로 이용된다.

棒-平板의 電極構造에서 印加電壓을 增加시켜 가면 어떤 電壓에서 電界가 集中되어 있는 先端部에서 빛과 함께 소리가 발생하며 電流値가 急上昇한다. 그 電流値의 變化狀態가 그림 4.2에 나타내어져 있다. 여기서 V_0 를 Corona

開始電壓이라고 부른다.

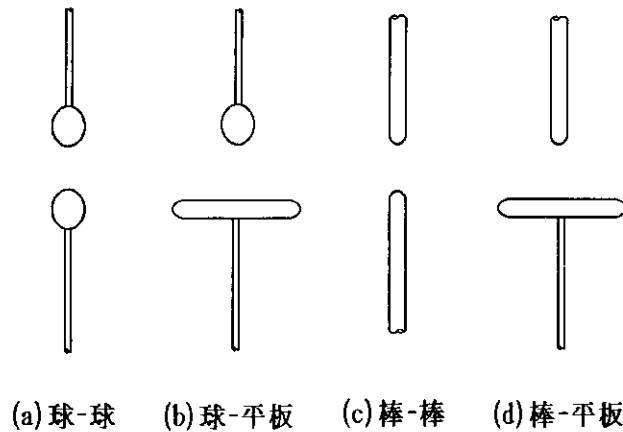


그림 4.1 不平等電界를 형성하는 電極構造의 例

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 附着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 弱化시키는 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.

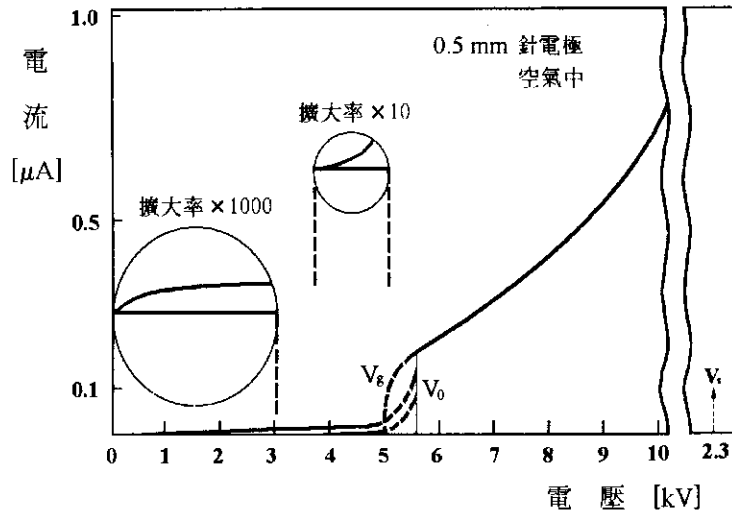


그림 4.2 針-平板 電極의 電壓-電流 特性
(V_0 : Corona 開始電壓, V_s : 불꽃 開始電壓)

4.1.3 기타 放電

種類가 다른 絶緣物의 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의 電界強度가 큰 경우에 일어나는 것으로서 發光을 同伴한다. 그림 4.3과 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 印加하면 絶緣體 表面위에 沿面 Corona가 발생된다. 針電極을 제거한 후 樹脂와 光明丹 (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 건조중에 높게 帶電한 粉體가 濾過布 또는 裝置 内壁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.

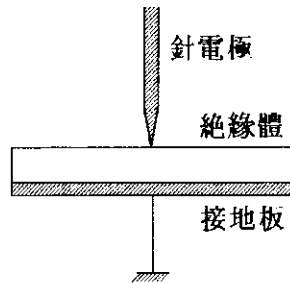


그림 4.3 沿面放電을 일으키는 電極 構造

空間電荷에 의한 放電은 雷放電 (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 번개불처럼 공간에서 나무가지 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 Zet Nozzle을

이용하여 바다물로 洗滌할 때 발생한다. 空間電荷에 의한 放電에는 雷放電 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.

4.2 靜電氣放電에 의한 可燃性 混合氣體의 點火

可燃性氣體로서는 水素, Etylene, 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 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 印加方法, 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.

4.2.1 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.

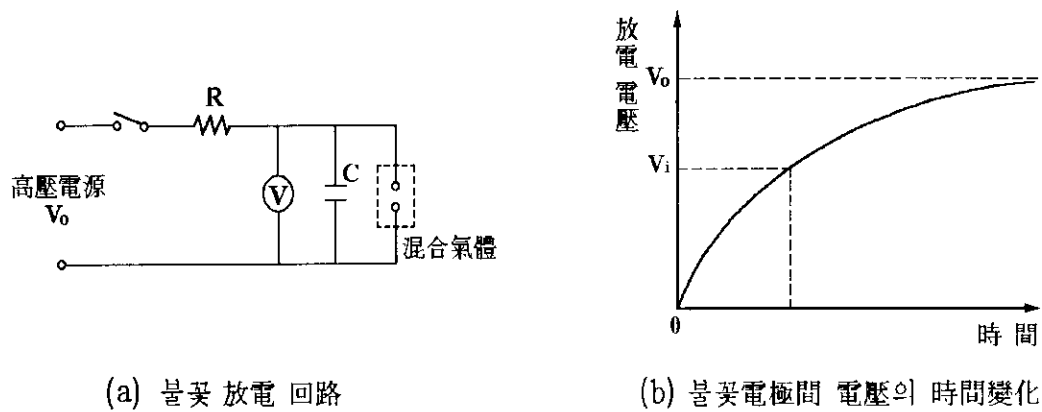


그림 4.4 容量法에 의한 불꽃放電 點火

그림 4.4 (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 4.4 (b)에 나타난 바와 같이 指數的으로 上昇한다. 만약 電極間電壓 V_i 에서 放電했다고 하면 이 때의 放電 Energy (W)는 다음과 같이 주어진다.

$$W = \frac{1}{2} C V_i^2 \quad (\text{J}) \quad (4-3)$$

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)이므로 Gas의 種類, 濃度, 壓力, 溫度를 一定하게 한 狀態에서 電氣的 條件을 여러 가지로 변화시켜 가며 이 Energy를 구한다. 可燃性 Gas의 相對濃度를 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.

4.2.2 Corona 放電에 의한 點火

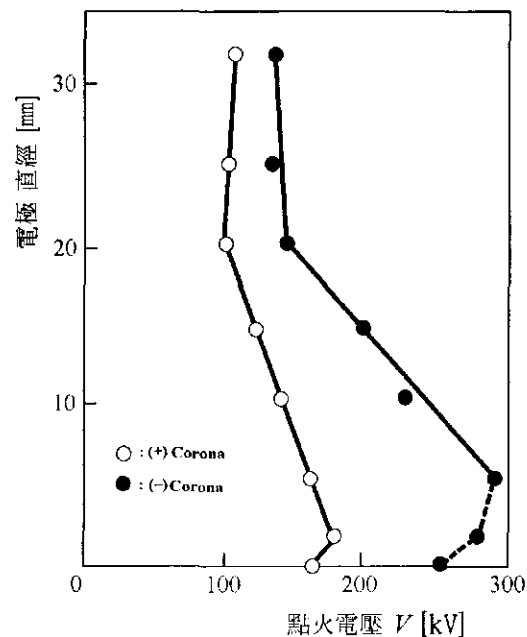


그림 4.5 Corona 放電의 點火電壓과 電極直徑의 관계

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 4.5에 나와 있다. 여기서도 陽(+) Corona가 負(-) Corona보다 點火能力이 더 큼을 알 수 있다.

4.2.3 面電荷 放電에 의한 點火

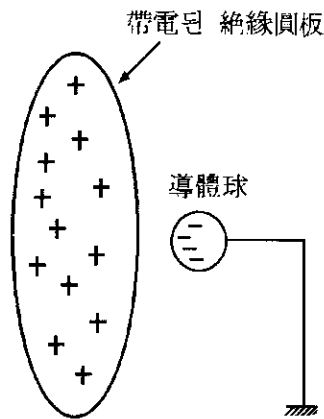


그림 4.6 帶電圓板과 導體球의 放電裝置

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 4.6에 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 이를 구하는 것이 쉽지가 않다. 絶緣物の 面積이 큰 경우는 放電에 의하여 中和되는 電荷는 일부분에 불과하다. 간단히 하기 위하여 導體를 球型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 電界强度가 중요한 要因이 된다.

表面電荷密度가 똑같은 경우의 電界分布의 計算例가 그림 4.7에 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.

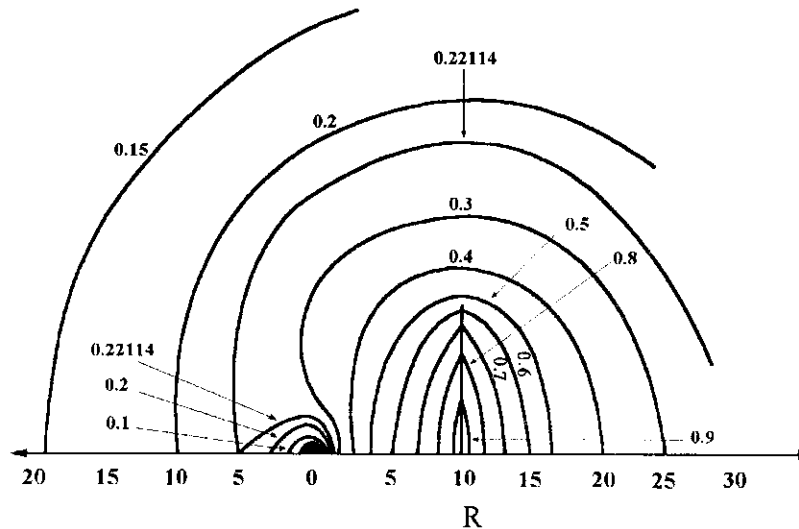


그림 4.7 帶電圓板과 接地球間의 電位分布

이러한 電極形狀에서의 放電에 의한 點火性を 알아보는 實驗이 실시되고 있는데, 放電의 形態는 Brush Corona 放電으로 나타나고 있다. 帶電面과 球를 Hexane 蒸氣와 空氣의 混合物중에 두고 金屬球를 面에 접근시켜 放電시키고 그 點火性を 조사한 것이 그림 4.8에 나타나어져 있다. 이 그림의 X-軸은 混合氣體의 濃度이고 Y-軸은 點火의 確率을 나타내고 있다. 그리고 X-軸 위의 U_{ex} 및 O_{ex} 는 불꽃放電을 일으켰을 경우의 爆發限界를 나타낸다. 이 경우에는 直徑 60 mm와 15 mm의 경우에 있어서 點火能力의 差異가 있는데 Hexane보다도 最小點火 Energy가 낮은 水素와 空氣의 混合物의 경우는 이 차이가 작게 된다. 또한 60 mm의 球에서는 대부분 불꽃放電에 가까운 點火性を 나타내고, 直徑 8 mm의 球에서도 어느 정도의 點火성이 있는 것을 나타내고 있다. 이들의 實驗結果는 Plastic 등의 帶電에 의한 放電도 충분히 위험하다는 사실을 보여주고 있다.

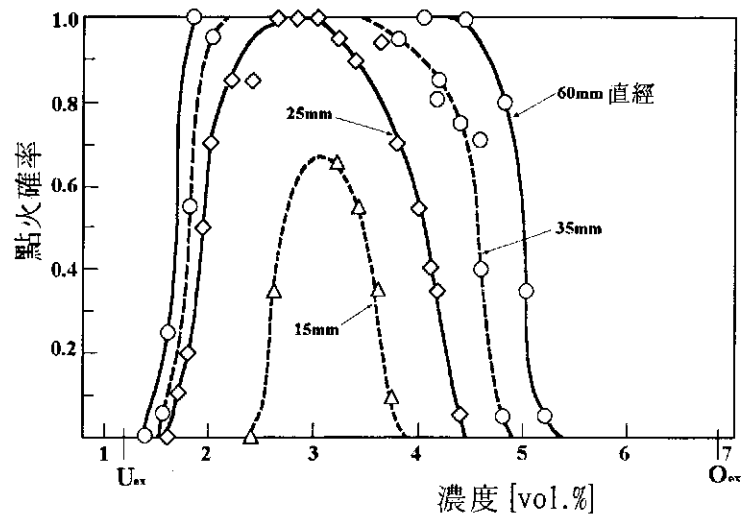


그림 4.8 Corona 放電의 點火 確率

4.2.4 空間電荷의 放電에 의한 點火

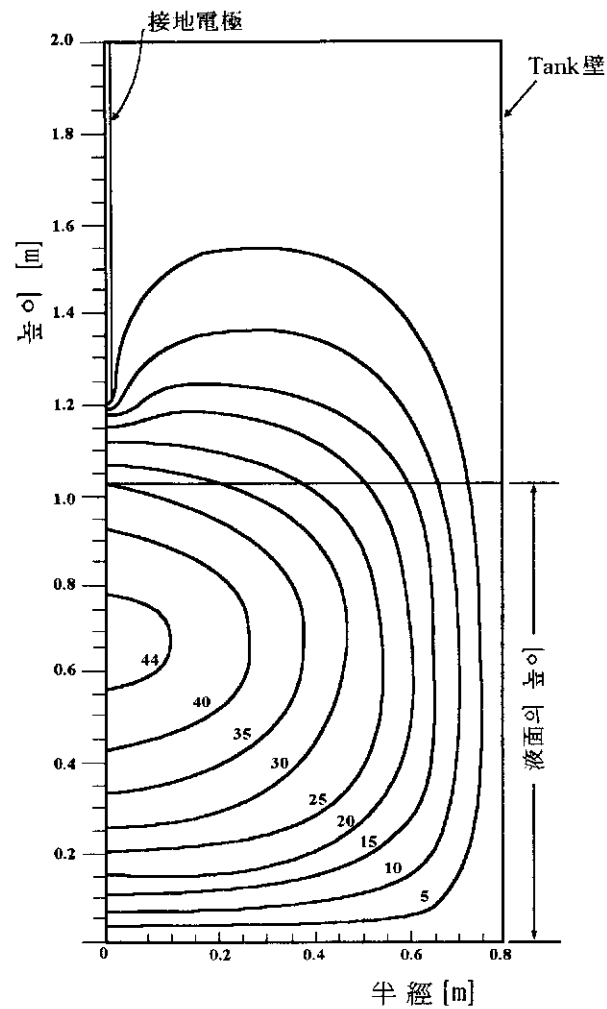


그림 4.9 帶電液體와 接地電極間の 電位分布 (單位: kV)

而上 電荷에 의한 放電의 點火性도 斜明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 관련

하여 石油産業 分野에서 연구가 활발히 진행되고 있다.

Tank 등의 경우도 電位分布를 解析的으로 구하기는 어렵고, 數值的으로 구해야 한다. 그 예를 그림 4.9에 나타냈다. 이 경우도 放電開始는 球上의 電界強度가 중요한 要素를 나타내고 있다고 생각된다. 이 空間電荷에 의한 放電의 點火性에 관한 실험결과가 몇 가지 발표되고 있다.

小規模인 Tank에 外部에서 강제적으로 帶電시킨 液體를 보내고 그 液面上部에 놓여진 球와 사이의 放電의 點火性을 조사한 것으로서, 작은 Tank (0.6l)이지만 注入 電荷密度가 $500 \mu\text{C}/\text{m}^3$ 에 도달하기 위해 表面電位는 40 kV 까지 올리는 것이 가능하다. 液體가 負(-)로 帶電한 경우의 放電은 金屬球에 附着한 液體가 電界에 의하여 형성되는 Tetragon (4角形)에서 發生하고 主放電路는 空間의 $1/4 \sim 1/3$ 에서 그 앞이 갈라져 나오고 때로는 液面に 달한다. 液體가 陽(+)으로 帶電한 경우는 金屬球상의 Tetragon 주위에 안정된 Corona가 보이고 數秒간 持續한다. 液體가 負(-)로 帶電한 경우에는 液體와 球 사이의 放電에서 Propane-空氣의 混合氣體에 點火시키는 것이 가능했는데, 液體가 陽(+)으로 帶電한 경우에는 어떠한 경우에도 點火·爆發을 일으키는 것이 가능하지 않다고 보고되고 있다.

1 k/ Tank의 Micro Filter에서 帶電한 無臭 Kerosene (石油)의 帶電에서 Johnson은 최고 250 kV의 表面電位를 얻고, Hexane 등과 空氣의 混合物의 點火 爆發實驗을 실시했다. 先端이 10 mm의 丸棒과 液面과의 放電을 관찰한 결과, 작은 Pulse로 이어진 放電이 나타났는데 이는 젖은 金屬表面에서 일어나는 放電으로 보이며, 橢圓型의 電極을 만들고 電極側面에서 放電 시키듯이 하여 큰 放電 Energy를 얻었다. Hexane 蒸氣와 空氣의 混合物을 點火시키는데 60 kV에서 $0.085 \mu\text{C}$ 의 電荷量을 필요로 하였다. 2 k/ Tank에서의 같은

실험에서는 球의 表面이 젖어도, 眞球와 橢圓球에서의 差異는 별로 없었다. 球의 直徑이 커지면, 放電에 의한 電荷量의 移動이 크게 되는데 그 상태가 그림 4.10에 보여지고 있다.

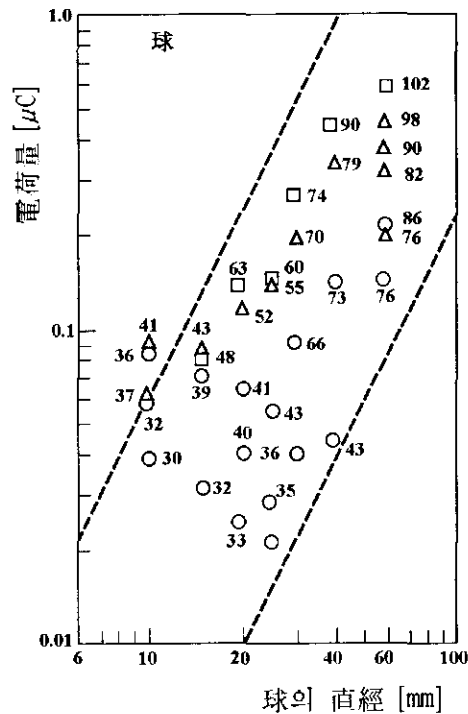


그림 4.10 放電電荷量과 電極直徑의 關係 (數値는 液面の 電位(kV)를 나타냄.)

帶電液體와 球의 放電은 특수한 것이고, 그림 4.11에 나타낸 例와 같이 放電이 간헐적으로 일어나고 그때의 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 μC 이므로, Propane-空氣의 混合物에서 약 3 mJ의 Energy를 요하는 것이 된다. 이것은 最小點火 Energy에 비교하면 상당히 크다. 球 電極의 直徑과 液面 電位の 關係를 그림 4.12에 나타냈다. 즉, 이 실험에 의하면 液面 電位가 약 60 kV 이상에서 點

火·爆發이 일어난다.

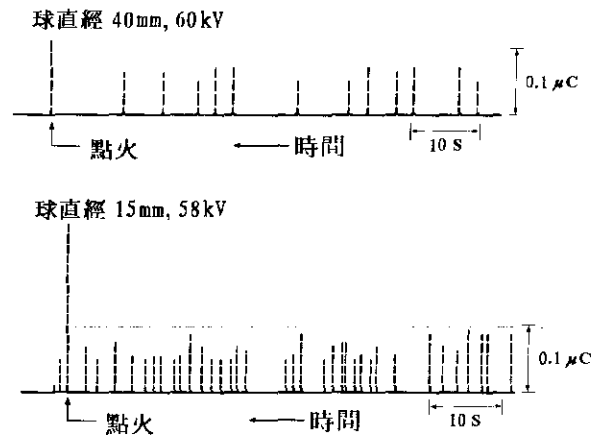


그림 4.11 帶電液體와 接地球間의 放電의 狀態

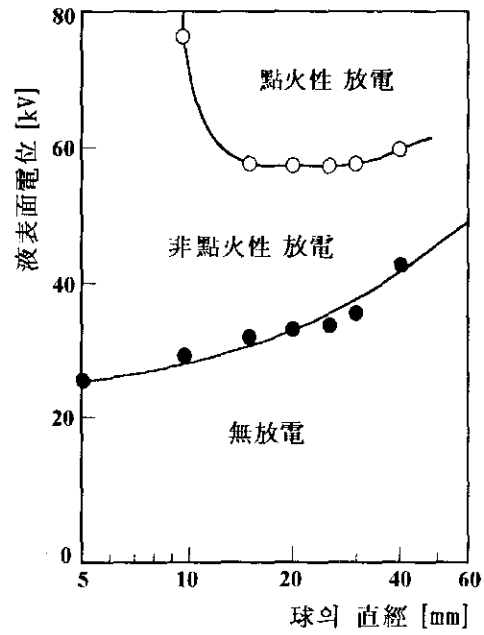


그림 4.12 點火에 미치는 球의 直徑과 表面電位の 關係

4.3 點火性 放電의 推定

여기서 點火性 放電이라고 하는 것은 帶電된 靜電氣가 放電할 때 방출하는 Energy가 點火能力을 갖는, 즉, 可燃性 混合氣體의 最小點火 Energy 이상이 되는 靜電氣 放電을 말한다. 이러한 點火性 放電은 可燃性 物質의 特性과 더불어 帶電物體의 放電特性 등 여러 가지 요인에 따라 다르므로 여기서는 點火性 放電의 여부를 推定하는 것에 대하여 고찰해 보고자 한다.

4.3.1 靜電氣 放電과 點火性放電의 推定

物體에 電荷가 帶電하면 정도의 차이는 있지만 그 순간부터 靜電氣의 放電이 일어나는데 이 放電은 帶電物體만의 特性에 의해서 정해지지 않는다. 또한 발생한 放電이 點火源이 되는지의 여부도 帶電物體에 의존하고 있는 것은 아니고 오히려 可燃性 物質, 放電特性 등에 의하여 달라지고 있다. 따라서 點火性 放電이 발생하는가의 여부는 帶電物質만에 착안하여도 정해지지 않고 帶電物體 외의 사항도 여러 가지 고려해야 한다. 즉, 앞에 서술되어 있듯이 可燃性 物質의 點火는 可燃性 物質과 靜電氣放電과의 相互作用에 의하여 발생하는 현상이므로 放電이 발생하는 帶電物體만을 고려해서는 點火性 放電이 발생하는지의 여부를 결정할 수 없다.

이렇게 帶電物體에 착안하여도 靜電氣 放電이라는 現象 및 이것에 起因하여 발생하는 可燃性 物質의 點火現象이 주로 帶電物體 周邊空間의 爆發 混合氣體내에서 일어나는 현상이므로 爆發性 霧圍氣를 고려하지 않고 點火性 放電이 발생하는가의 여부는 일반적으로 판단할 수 없는 것이다.

특히, 여기에서 문제가 되는 放電은 爆發性 混合氣體가 存在하는 空間내

에서의 放電이고 그 特性은 일반적으로 이 空間내의 氣體 및 그 組成, 氣壓, 溫度, 濕度 등에 영향을 받는다. 또한 앞에서 서술된 바와 같이 氣體 空間에 형성되는 電界分布가 放電의 對向電極 (보통 接地體)의 形狀, 放電距離 등에 따라서 變化하고 放電이 발생하여도 이것에 의하여 Corona 放電이 되거나 불꽃放電이 되거나 한다 (表 4.1). 즉, 對向電極에 의하여 放電特性이 變化하고 이것에 의하여 單位時間當 放電 Energy도 變化한다.

표 4.1 帶電液面과 各種 接地體와의 放電特性

接地體 形狀	放電 距離 (cm)	放電 形態	放電 電荷量 (nC)	放電 Energy (mJ)
針	1 ~ 5	Corona	< 1	< 0.001
60° 角의 針	0.25	불 꽃	28	0.27
	1.0	Corona	0.9	0.003
	5.0	Corona	0.9	0.008
6.4 mm 球	2.5	Corona	4.0	0.04
	10.0	Corona	2.0	0.02
13 mm 球	2.5	Streamer	97	0.91
	7.5	Streamer	27	0.34
	10.0	Streamer	24	0.39
25 mm 球	2.5	Streamer	49	0.43
	5.0	Streamer	65	0.57
	10.0	Streamer	72	1.78

한편, 放電과 더불어 點火도, 放電이 발생하는 氣相空間, 즉 爆發混合氣體의 特性에 직접 의존한다. 예를 들면 앞의 2장에서 기술되어 있듯이, 可燃性 物質의 點火 Energy가 爆發混合氣體를 생성하고 있는 可燃性 物質의 濃度, 氣相空間의 溫度, 壓力 등에 의하여 변화한다. 또한, 點火 Energy는 그림 4.13 및 4.14에 나타나 있듯이 放電이 발생한 氣相空間의 氣壓, 溫度에 따라

서도, 혹은 氣相空間에 氣流가 있는 경우는 그 速度에 따라서도 변한다. 따라서 발생한 放電의 Energy가 같더라도, 氣相空間의 특성에 의하여 點火하거나 點火하지 않거나 한다. 즉, 帶電物體에서 발생한 放電이 點火性 放電이거나 그렇지 않거나 한다.

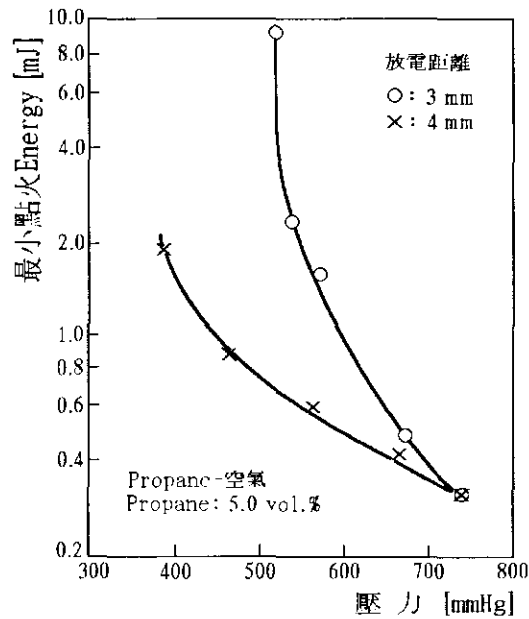


그림 4.13 氣壓의 變化에 따른 點火 Energy의 變化

이상과 같이 放電, 點火 모두 帶電物體의 특성보다는 오히려 이것들이 발생하는 氣相空間의 特性 및 對向電極의 形狀 등에 직접 의존하고 있다. 따라서, 帶電物體는 放電이 발생하기 위하여 필요한 조건의 하나인 電界를 생성하는 것 외에는 放電 및 이것이 點火源이 되는 點火性 放電인가의 여부는 결정할 수 없는 것이다. 이렇게 帶電物體의 특성만으로는 點火性 放電의 발생이 확정되지 않으나, 帶電物體에서 點火性 放電이 발생하는가의 여부는 개략적으로 알 수 있다. 이것은 點火性 放電의 발생이 그 根底에 帶電物體에 생

기는 電界에 기인하고 있기 때문이고, 여기에 위에서 언급한 氣相空間의 特性, 對向電極의 形狀 등을 고려하면 좋은 것이다. 즉 이들을 고려하면 點火性 放電의 발생은 확정적이지는 않지만 개략적인 推定은 가능하다.

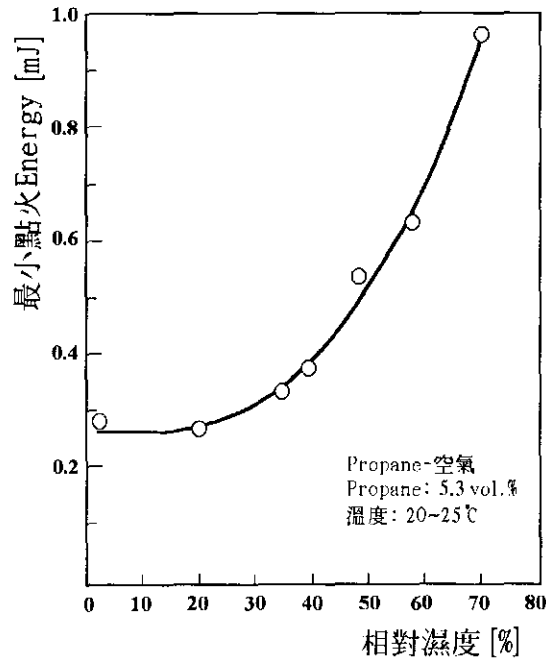


그림 4.14 相對濕度の變化에 따른 點火 Energy의 變化

4.3.2 帶電物體의 特性과 點火性放電의 推定

帶電物體에서 발생하는 放電이 點火性 放電인가의 여부는 앞서 서술한 바와 같이 帶電物體만을 고려해서는 결정할 수 없다. 그러나 발생한 放電이 點火性 放電인가의 여부는 거의 그 放電 Energy에 의하고 있다. 즉 放電 Energy가 可燃性物質의 點火 Energy 이상이면 點火性 放電이고, 放電 Energy가 그보다 작으면 點火性 放電이 아니다. 따라서 帶電物體에 착안한 點火性 放電의 推定은 帶電物體에서 放射되는 放電 Energy와 可燃性物質의

點火 Energy와의 문제이고, 최종적으로는 帶電物體에서 放射되는 放電 Energy의 量과 그 最大值를 推算하는 것으로 귀결된다.

이제부터 여기서는 帶電物體에 착안한 點火性 放電의 發生과 帶電物體에서 放射되는 放電 Energy가 帶電物體의 특성에 의하여 어떻게 변화되는가 하는 것에 대해서 기술하고자 한다.

가. 導電率 또는 固有抵抗과 放電 Energy

放電 Energy는 4.2절에 서술되고 있듯이, 放電의 對向電極이 되는 電極形態, 氣相空間의 特性 등에 의하고 있다. 그리고 이들의 조건이 정합되면 帶電物體에서 큰 Energy가 방사되고 點火性 放電이 된다. 그러나 放電 Energy는 帶電物體의 導電率에도 의존하고 있고, 導電率이 작은 帶電物體에서는 이것이 큰 것과 비교하여 일반적으로는 放電 Energy가 작다.

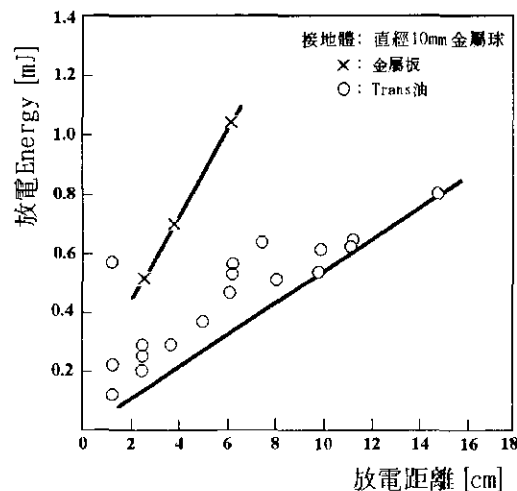


그림 4.15 帶電物體의 導電率의 差異와 放電 Energy

예를 들면 帶電物體가 金屬과 같은 導體이면 이것에 累積되고 있던

Energy가 放電에 의하여 거의 모두 放射되는 수가 있다. 즉 식 (4-3)에서 나타났듯이 帶電物體가 갖고 있는 Energy가 거의 모두 放射된다. 그러나 導電率이 10^{-8} S/m 정도보다 작게 되면 帶電物體의 Energy가 모두 放射된다고 할 수 없으며 그 일부만이 放射된다. 그림 4.15에 나타낸 特性도 그 一例이고, 이 例와 같이 放電 Energy는 帶電物體의 導電率에 의하여 變化한다. 또한 그림 4.16에 나타났듯이 導電率이 비교적 작은 帶電物體를 對象으로 하여도 導電率이 크게 되면 放電 Energy는 증가하는 傾向이 있다. 단, 그림 4.16에는 이 關係가 放電 Energy가 아니고, 放電電荷量이 이것과 거의 比례關係에 있기 때문에, 放電電荷量에 의하여 나타나고 있다.

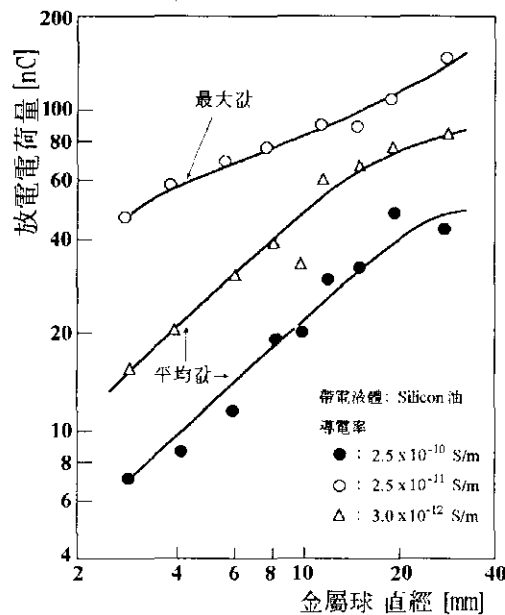


그림 4.16 帶電物體의 導電率과 放電 電荷量

이렇게 放電 Energy는 帶電物體의 導電率에도 依存하고 있고, 放電 特性도 導電率이 작을 때에는 Corona 放電, Streamer Corona 放電이었던 것이,

이것이 크게 되면 불꽃放電이 되거나 한다. 그 결과, 導電率이 크면 단순히 放電 Energy가 큰 것만이 아니고 이것이 數 μs 라는 극히 짧은 시간에 放射되므로 放電 Energy의 時間密度 (電力)가 크게 되고 點火 確率도 커지게 된다. 따라서 點火性 放電의 발생을 推定할 경우는 帶電物體의 導電率 (또는 固有抵抗)을 고려하고 導電率이 큰 것에서는 이것이 작은 것보다 작은 帶電電位나 帶電電荷量에서도 點火性 放電이 발생한다고 推定해야 한다.

나. 크기 및 形狀과 放電 Energy

帶電物體의 導電率이 10^{-6} S/m 정도보다 큰 導體의 경우는 放電 Energy가 帶電物體의 크기에 의존한다. 이것은 導電率이 이렇게 크면 電荷는 거의 帶電物體의 표면에 帶電하듯이 되고 帶電電位도 장소에 따라서 변화가 없고 帶電物體 전체가 거의 等電位가 된다. 그 결과 이제부터는 放電이 발생하면 金屬에서의 放電과 모두 같지는 않지만 거의 유사하게 帶電物體에 帶電하고 있던 電荷가 一時에 放射되는 수도 있으며, 帶電量이 크면 이것에 비례하여 放電 Energy도 크게 된다. 따라서 點火性 放電이 될 확률도 그만큼 높아지게 된다.

또한 放電 Energy는 帶電物體의 形狀에도 의존하고 있다. 예를 들면 그 形狀의 일부에 針狀, Knife狀, 纖維狀과 같은 曲率半徑이 작은 突起物이 있으면 放電은 그곳에서 발생하지만 그 放電 Energy는 單位時間當 Energy (電力)가 작으므로 그림 4.8에 一例를 나타냈듯이 點火性 放電이 될 확률도 작다. 즉 帶電物體의 形狀에 曲率半徑이 작은 부분이 있으면 이 帶電物體에서는 點火性 放電이 일어날 확률이 작게 된다.

한편, 크기 및 形狀의 영향은 帶電物體의 導電率이 10^{-8} S/m 정도보다 작

은 不導體의 경우도 같은 모양이고, 導體 정도는 아니지만 크기에 따라서 放電 Energy가 변한다. 특히, 帶電物體가 絶緣性 液體, 粉體 등에서 帶電電荷가 空間電荷를 형성하고 있는 경우는 放電 Energy가 空間電荷의 크기에 따라서 변한다. 예를 들면 帶電한 液體를 길이 (크기)가 다른 Tank에 넣고 點火性 放電이 발생하지 않는 電荷密度를 구하면 그림 4.17에 나타낸 결과가 얻어진다. 이렇게 點火性 放電이 발생하지 않는 電荷密度는 帶電物體가 어떤 크기에 있을 때에 最小가 되고, 이 電荷密度에서는 Tank가 이보다 크거나 작더라도 點火하지 않는 것을 보여주고 있다. 이것은 바꿔 말하면 帶電物體의 크기가 電荷密度의 最小가 되는 크기일 때 點火性 放電이 가장 일어나기 쉬운 것을 나타내고 있고, 그 特性이 Paschen의 法則에 類似한 曲線인 것도 흥미 있는 점이다.

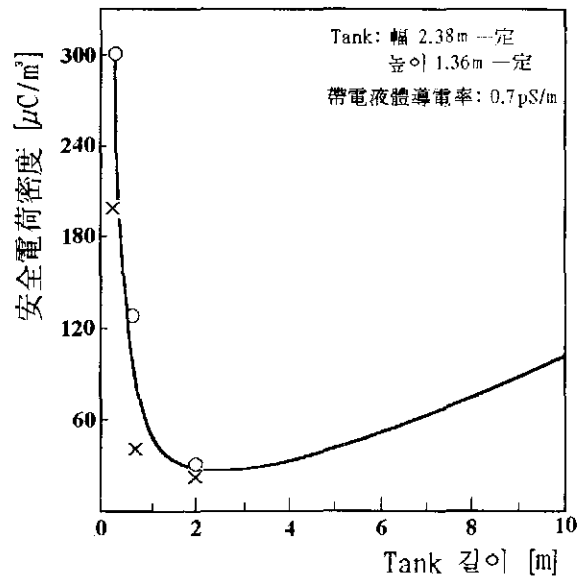


그림 4.17 Tank의 크기와 點火性 放電이 發生하지 않는 帶電電荷 密度

이상과 같이 電荷가 空間電荷를 형성하는 경우는 帶電物體의 크기가 點火

性 放電의 발생에 영향을 미치는 것이 된다. 이것은 다른 觀點에서 보면 電荷의 帶電狀態, 즉 電荷의 帶電分布를 帶電物體의 형상으로 간주하면, 이에 의하여 點火性 放電의 發生 限界가 변화하는 것도 있다. 이렇게 帶電物體가 不導體인 경우도, 點火性 放電의 推定에는 帶電物體의 크기 및 形狀을 고려할 필요가 있다. 그러나 電荷가 空間電荷를 형성하는 帶電이 아니고 表面에 帶電하는 경우는 帶電物體의 크기 및 形狀이 點火性 放電의 발생에 것처럼 영향을 미치지 않는다. 단지, 이 경우는 形狀 및 크기 이외의 것이 크게 영향을 미치게 되는데, 이에 대해서는 다음에 알아보기로 한다.

다. 背面接地 金屬과 放電 Energy

帶電物體가 Film, 종이 등과 같이 電荷가 表面에 帶電하는 帶電物體이고 그 背面에 接地된 金屬板이 있으면 이것에 그림 4.3에 나타난 接地體가 접근할 때 帶電物體와의 사이에는 沿面放電이 발생한다. 따라서 帶電物體에 이러한 背面接地 金屬板이 있는 경우는 放電 Energy가 극히 크게 되고, 點火性 放電이 발생된다고 推定해야 한다.

예를 들면 Film에 圓形의 背面接地 金屬板을 설치하고, 그 중심의 對向部分에 接地金屬球를 접근시키면 瞬間의 放電에 의하여 放電 電荷量은 背面接地 金屬板이 없을 때의 $10^4 \sim 10^5$ 배가된다. 그림 4.18도 그 一例를 나타낸 것이고 背面接地 金屬板의 面積이 크게 되면 放電電荷量이 증대하고 있다. 즉, 放電 Energy가 背面接地 金屬板에 의존하고 그 面積이 크게 되면 沿面放電이 발생하고, 이 放電은 點火性 放電이 될 確率이 극히 높은 것을 나타내고 있다. 또한, 그림 4.19는 이것을 Film의 두께를 바꿔 조사한 實驗의 例이고 帶電物體에 背面接地 金屬板이 있으면 접근하는 接地體에는 거의 無關하

게 放電 電荷量이 增大한다.

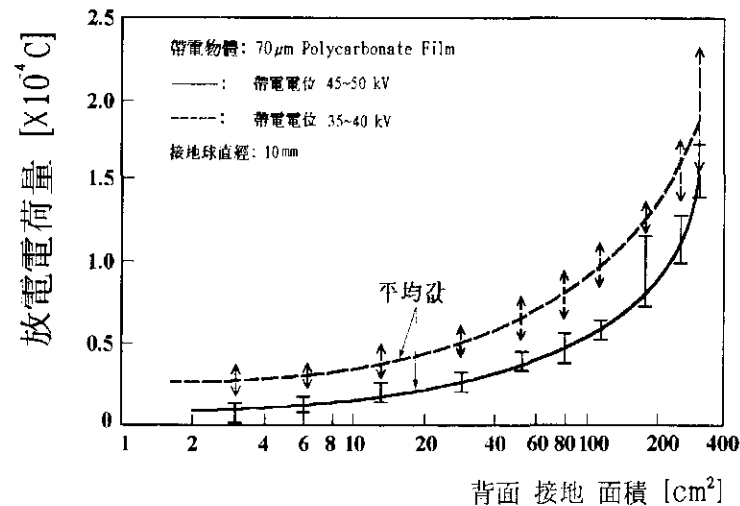


그림 4.18 放電 電荷量에 미치는 背面接地 金屬板의 影響

이렇게 帶電物體에 背面接地 金屬板이 있으면 이것이 없는 경우와 비교하여 放電 Energy는 극히 크게 된다. 그러나, 帶電電位 등을 측정하면 背面接地 金屬板의 영향에서 電位는 낮게 관측된다. 따라서 이러한 경우는 帶電電位가 낮아도 點火性 放電이 발생한다고 推定해야 하고, 이 점에 留意할 필요가 있다.

이상의 事項은 背面接地 金屬板이 있는 Film 및 종이 등의 帶電物體에 한정된 것은 아니고, 帶電物體가 粉體인 때에도 다음과 같은 경우에는 같다. 예를 들면 集塵電極에 堆積된 粉塵 등이 이에 관한 典型的인 例로서, 이 경우는 點火性 放電의 推定에 같은 配慮를 해야한다. 또한, 粉塵의 경우는 이것이 可燃性 液體 및 그 蒸氣 등을 吸着하고 있는 것도 있어 이 때에는 특히 留意할 필요가 있다. 그것은 粉塵이 可燃性 液體 및 蒸氣 등을 吸着하고 있으면 粉塵이 浮遊하고 있는 경우, 혹은 單一 可燃性 蒸氣 만으로 爆發性 混合氣體

를 생성하고 있는 경우보다 극히 작은 點火 Energy에 의하여 이것이 點火하기 때문이다. 즉, 이러한 경우는 點火 Energy가 작은 것 외에 帶電物體에서 발생하는 放電은 沿面放電이 되고 그 Energy가 크므로 點火性 放電의 推定에는 보통보다 작은 電荷密度와 낮은 帶電電位를 尺度로 해야 한다.

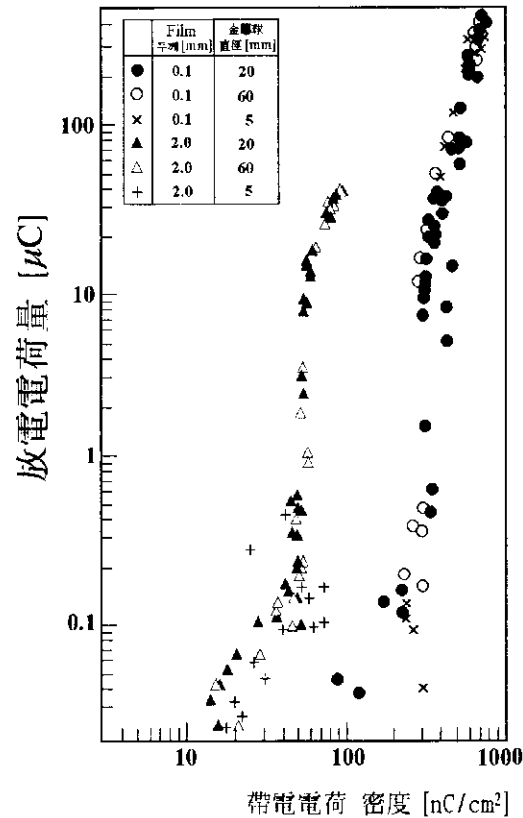


그림 4.19 Film의 두께와 放電 電荷量

라. 기타 要因과 放電 Energy

放電 Energy는 이상에서 서술한 要因 외에 帶電物體의 極性에도 依存한다. 이것은 4.2절에서 언급한 바와 같이 放電特性이 放電의 極性에 따라 다르

기 때문이고, 일반적으로는 放電의 極性이 陽(+)이면, 空間電荷의 영향이 작고, 放電 Energy는 크게 된다. 이렇게 放電特性이 極性에 의존하고 있으므로 帶電物體의 極性과도 결부, 이것도 點火性 放電의 推定에 고려해야 하는 것이다. 예를 들면, 帶電物體가 負(-)로 帶電하고 있어도 이것보다 작은 形狀의 接地體가 접근하면 放電은 接地體 쪽에서 발생하므로 陽(+)의 放電이 일어난다. 이렇게 이 例에서는 帶電物體의 極性이 負(-)이므로 點火性 放電이 될 확률이 높은 陽(+)의 放電이 발생한다.

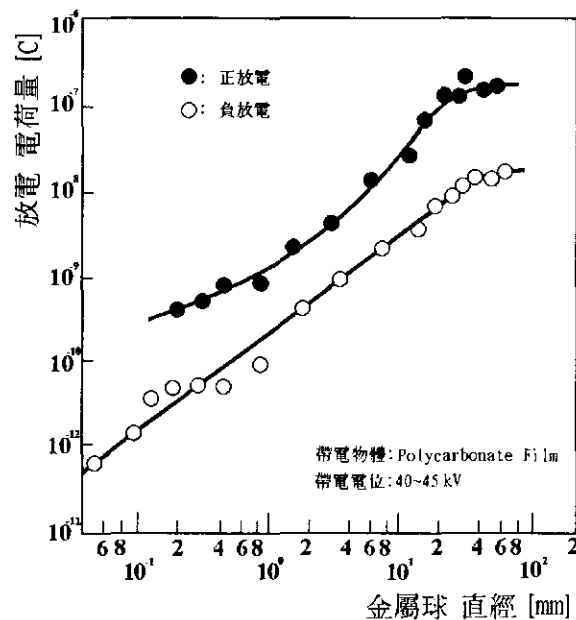


그림 4.20 金屬球의 直徑과 放電 電荷量

그림 4.20에 나타내는 결과도 그 一例이고 이것은 Film에 接地 金屬球를 접근시키고 이 때 발생한 放電 1회당의 放電 電荷量を 조사한 것인데, 이 結果에서도 Film이 負(-)로 帶電되어 있으면 Corona 放電이 발생하므로 放電 電荷量은 크게 된다. 이와 같이 帶電物體가 陽(+)의 放電을 일으키는 極性으

로 帶電되어 있으면 負(-)의 放電인 경우보다 放電 Energy가 크고 點火性 放電이 발생하기 쉽다고 推定해야 한다.

그밖에, 放電 Energy는 帶電物體가 移動하고 있으면 그 速度에도 의존한다고 보고 있다. 이것과 類似한 것에서는 帶電物體가 振動할 때도 같고, 帶電 電位가 변화하면 點火性 放電이 발생하기 쉽다고 한다.

4.3.3 點火性放電의 發生限界的 推定

點火性 放電은 물론 放電이 발생한 후의 일로서 결과적으로는 放電 Energy와 點火 Energy의 相互關係에 의하고 있다. 그러나 點火性 放電의 推定은 放電이 발생하기 전의 事象에 기초하고 있고, 그 推定에는 帶電物體에 착안하는 것이 좋다. 이것은 點火性 放電의 발생에 不可缺한 電界가 帶電物體에 의해서 생성되고 있고, 可燃性物質의 點火에 필요한 Energy가 帶電物體에 의하여 공급되기 때문이다.

이렇게 帶電物體에 착안하면 點火性 放電의 發生限界는 앞에도 서술한 帶電物體에서 放射되는 放電 Energy와 點火性 Energy에 歸結한다. 즉 前者가 後者에 거의 근접한 帶電이면 이것이 點火性 放電의 發生限界가 된다. 따라서, 이것을 기본으로 하고 여기서는 點火性 放電의 發生限界를 推定한다. 단, 放電特性 및 放射 Energy는 帶電物體가 導體인 경우와 不導體인 경우에 따라서 큰 差가 있으므로 그 2 가지 경우로 구별하여 서술하기로 한다.

點火性 放電의 發生限界는 放電 Energy 및 點火 Energy를 기본으로 하고 있는데, 後者는 2章에서 서술하고 있듯이 可燃性物質의 種類, 支燃性 Gas의 種類, 爆發性 混合氣體의 壓力, 溫度 등에 따라서 크게 변화한다. 따라서 아래에서 서술하는 發生限界는 달리 말하지 않는 한 常溫, 大氣壓, 空氣를 支燃

性 Gas로 한 경우의 最小點火 Energy에 대한 것이고, 이 條件이 아닌 경우는 發生限界도 변화한다. 또한, 發生限界의 推定에는 보통 帶電物體의 Energy가 아니고, 이것에 관계가 있는 帶電物體의 電位, 電荷密度 등도 尺度로 한다. 그러나 이들은 帶電物體의 Energy가 같더라도 測定方法 및 條件에 따라서 그 數値가 변화한다. 따라서 點火性放電의 發生限界의 推定에는 이러한 點에 留意할 필요가 있다.

가. 導體의 點火性放電의 發生限界

帶電物體가 導電率 10^{-6} S/m 정도 이상, 또는 表面固有抵抗이 $10^7 \Omega$ 정도 이하이면 放電이 발생할 때, 帶電物體의 Energy는 순간적인 放電에 의하여 모두 放射되는 수가 있다. 따라서, 帶電物體가 導體인 경우는 이것이 갖고 있는 靜電氣 Energy가 모두 點火에 寄與한다고 판단되고, 이 Energy가 放電 Energy와 같고 동시에 最小點火 Energy와 같다고 생각되며, 이것에 의하여 點火性 放電의 發生限界를 推定하는 것이 좋다. 즉, 帶電物體의 電位를 V [V], 最小點火 Energy를 E_i [J], 帶電物體의 靜電容量을 C [F]로 할 때, 앞에 나와 있는 식 4.3이 最小點火 Energy E_i [J]에 같다고 생각되며 지금부터 點火性 放電의 發生限界를 推定하는 것이 좋다. 이것은 帶電電位로 나타내면 다음과 같다.

$$V = \sqrt{\frac{2E_i}{C}} \quad (4-4)$$

또한, 이것은 帶電物體의 電荷量 Q [C]로 나타내면 $Q = CV$ 에서 다음과 같이 된다.

$$Q = \sqrt{2CE_i} \quad (4-5)$$

예를 들면, 帶電物體가 成人 男子인 경우이면 이 靜電容量은 보통 短靴를 着用하고 서 있을 때 靜電容量은 100 pF 정도이므로, 最小點火 Energy가 0.2 mJ 정도인 Propane 등의 爆發性 混合氣體에 대해서는 點火性 放電의 發生限계를 電位로 나타낼 때, 식 4-4에서 $V = 2000 \text{ V}$, 電荷量으로 나타내면 식 4-5에서, $Q = 2 \times 10^{-7} \text{ C}$ 가 된다.

表 4.2 人體動作에 따른 人體의 帶電電位

人體의 動作	人體 帶電電位 (kV)	備 考
Nylon Carpet의 위를 보행	2.0 ~ 2.5	運動靴 着用
Nylon Carpet 위에서 분지류	4.5	運動靴 作用
Sofa에서 일어남	3.5 ~ 4.5	Rayon 混綿 着衣
Arcryl Sweater의 脫衣	4.5 ~ 5.0	
Polyester 作業服의 脫衣	4.0 ~ 4.5	
Arcryl 毛布의 折疊作業	5.0 ~ 6.0	Rayon 混綿 着衣

또한, 最小點火 Energy가 0.02 mJ 정도인 水素 등의 爆發性混合氣體에 대해서는 點火性 放電의 發生限界가 같게 되고, 電位로 나타내면 $V = 632 \text{ V}$, 電荷量으로 나타내면 $Q = 6.3 \times 10^{-8} \text{ C}$ 가 된다. 즉, 人體의 帶電電位가 2000 V 정도가 되면 Propane, 水素와 같은 可燃性物質에 點火하는 危險性이 발생한다. 이 人體 帶電電位 2000 V는 表 4.2에 나타나 있듯이 乾燥한 環境일 경우 衣服을 벗거나 Carpet 위를 걸거나 또는 Sofa에서 일어서는 등의 簡單한 動作에 의해서도 발생하는 帶電量으로서, 人體帶電이 매우 危險한 것임을 뒷받침하고 있다.

한편, 導體의 金屬, 金屬片 등 靜電容量이 작은 帶電物體이지만 이것들이 극히 작은 間隔으로 絶緣되어 集合體를 형성하고 있는 경우가 있다. 이러한

帶電物體는 그 일부에서 放電이 발생할 때 이것이 제기가 되어 전체가 放電하는 수도 있다. 따라서 이러한 경우에도 點火性 放電의 推定에는 앞에서 서술한 식을 이용할 수 있고, 이 때에는 集合體를 하나의 帶電物體로 생각하여 推定하는 것이 좋다.

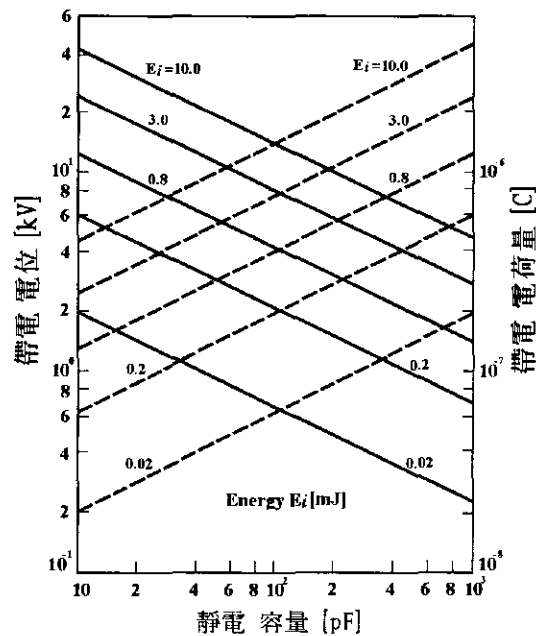


그림 4.21 放電 Energy를 구하는 Monogram

예를 들면 不導體의 중에 導體가 數 mm 정도의 거리를 두고 點在하여 있어, 그 導體가 帶電하고 있는 경우 또는 導體는 帶電하지 않아도 不導體가 帶電하고 있고 導體는 그 靜電誘導를 받고 있는 경우 등이 있다. 이러한 때는 災害防止 立場에서 導體의 集合體를 하나의 帶電物體로 간주하여 이것에 의하여 點火性 放電의 發生限界를 推定하는 것이 좋다.

또한, 그림 4.21은 點火性 放電의 發生限界를 부여하는 식 4.4 및 4.5를 帶電物體의 靜電容量을 變數, 點火 Energy는 Parameter로 하여 나타낸 것이다.

이상과 같이 帶電物體가 導體인 경우, 點火性 放電의 發生限界가 비교적 명확하게 推定된다. 따라서, 接地가 곤란하고 또한 帶電하기 쉬운 고무, 潤滑油에 의하여 絶緣된 金屬製 回轉物體, 可搬刑의 金屬製容器, 人體 등은 靜電容量을 먼저 구한 후 點火性 放電의 發生限界를 조사하는 것이 편리하다.

나. 不導體의 點火性放電의 發生限界

帶電物體의 導電率이 10^{-8} S/m 정도 이하, 또는 表面 固有抵抗이 $10^9 \Omega$ 이상의 不導體이면, 放電이 될 때 金屬과 같이 帶電物體의 全 電荷가 一時에 放射되지는 않는다. 따라서 不導體의 點火性 放電의 發生限界는 일반적으로 導體보다 큰 帶電이 된다. 그러나 帶電物體의 全 電荷가 放電하지 않고 보통은 일부 電荷가 放電하고, 또한 이것이 條件에 따라 변화하므로 不導體의 경우는 放電 Energy의 推算, 더 나아가서는 點火性 放電의 發生限界를 推算하는 것이 곤란하게 된다. 또한, 帶電物體가 不導體의 경우는 帶電하고 있는 電荷가 表面만이 아니고, 내부에도 존재하는 것이 있고 電荷分布도 매우 複雜하다. 이 때문에 點火性 放電의 發生限界도 導體와 같이 단순히 推定하는 것이 가능하지 않다. 따라서 여기서는 帶電物體를 몇 가지의 경우로 나누고, 이에 대한 發生限界를 推定하고자 한다.

일반적으로 帶電物體와 接地한 金屬球를 一定한 거리로 유지하고 帶電物體에 電荷를 부여하여 가면 帶電物體의 電位가 상승하고 帶電物體와 接地金屬球와의 사이에 처음에는 아주 미약한 放電이 발생한다. 그러나 이 放電은 肉眼으로 관찰할 수 있는 것은 아니고, 點火性 放電이 될 확률도 극히 작은 放電이다. 이 放電에 의해서도 帶電物體의 電荷는 잃게 되지만 그 以上の 電荷를 주면 電位가 더욱 上昇하고, 그 다음에는 破壞音を 同伴하는 Streamer

Corona 放電과 같은 처음 放電보다도 큰 放電이 발생한다. 이 放電은 點火性 放電이 될 확률이 큰 것이고, 이 放電이 일어나는 帶電이 點火性 放電의 發生限界를 推定하는 하나의 Hint가 된다. 물론 이 放電이 발생하는 帶電은 4.2 절에서 서술하고 있듯이 接地 金屬球의 크기, 이것과 帶電物體와의 거리에 따라서 변화한다. 그림 4.22도 그 一例를 나타낸 것이고, 이러한 放電은 金屬球의 直徑 및 이것과 帶電物體와의 距離가 작으면 帶電物體의 電位는 낮게 라도 발생한다. 그러나 帶電電位가 낮을 때에 발생한 放電은 일반적으로 Energy가 작고, 點火 Energy에 미치지 못하는 것이 많다. 따라서 點火性 放電이 되기 위해서는 帶電電位가 어느 정도 높게 되어야 한다. 이에 필요한 帶電電位가 點火性 放電의 發生限界를 주는 하나의 Hint가 된다.

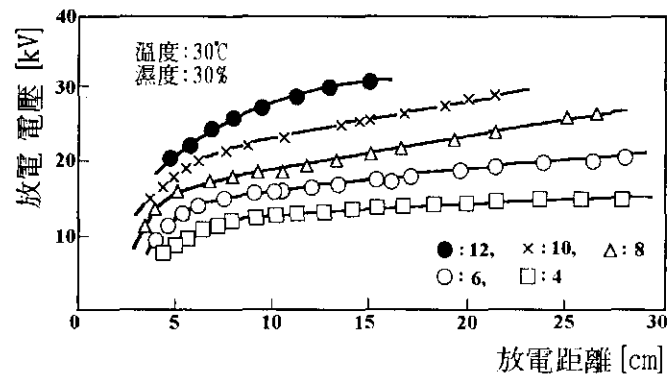


그림 4.22 Streamer Corona 放電 發生電壓

예를 들면, 帶電物體가 Film과 같은 表面 帶電物體이면 이것이 負(-)로 帶電하고 있을 때는 帶電電位가 30~35 kV가 되어 발생하는 破壞音을 동반하는 放電이 일어나는데, 이것은 Propane-空氣의 混合氣體 (混合濃度 5.0 %)를 點火시킬 수 있는 放電이다. 水素-空氣의 混合氣體 (混合濃度 32 %)에 대해서는 帶電電位가 10~30 kV 이상이 되면, 이때 발생하는 앞과 같은 放電에 의

하여 이 水素 混合氣體가 點火한다. 또한, 金屬板을 Polyester Film으로 덮고 金屬板에 電荷를 부여한 실험에서는 그림 4.23에 나와 있듯이, Film의 帶電電位가 15 kV 이상이 된 때, Propane-空氣의 混合氣體 (混合濃度 5.0%)가 點火하고, 이 경우 點火시키는데 필요한 帶電電位는 Film의 두께가 크게 됨에 따라서 높아지는 것으로 판명되고 있다.

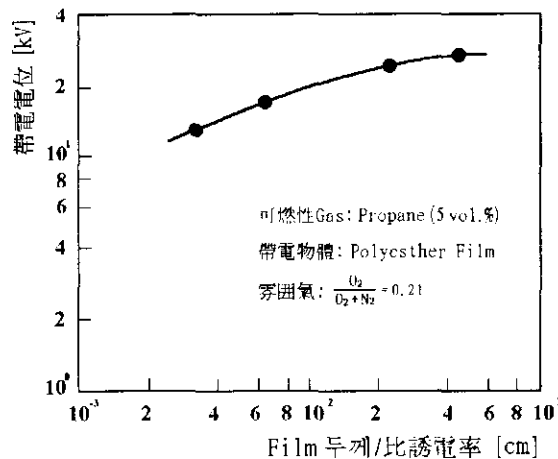


그림 4.23 Propane에 대한 點火性 放電의 發生電位

다음에, 帶電物體가 液體에서 帶電電壓이 空間電荷를 형성하고 있는 경우
 에는, 變壓器油에 帶電시켜 조사한 실험에 의하면, 이것이 負(-)로 帶電하고
 있을 때는 液面電位가 28~30 kV이고 Propane-空氣의 混合氣體 (混合濃度
 5.0 %)에 點火한다. 또한, 液體가 陽(+)으로 帶電하고 있을 때에는 액면電位
 가 30~40 kV가 될 때, 동일한 Propane-空氣 混合氣體에 點火한다. 그리고 點
 火爆發의 發生限界를 液體의 電荷密度로 나타내면, 그림 4.17에 나타난 바와
 같이 電荷密度가 20~25 $\mu\text{C}/\text{m}^3$ 이상이 될 때, 點火性 放電이 발생하고 있다.

이렇게 帶電物體가 不導體인 경우는 點火性 放電의 發生限界가 帶電電位

에서는 30 kV, 電荷密度에서는 $20 \mu\text{C}/\text{m}^3$ 정도로 推定되고 있다. 단, 이것은 最小點火 Energy가 0.2 mJ 정도의 可燃性 物質을 대상으로 한 경우이고, 水素와 같이 點火 Energy가 0.02 mJ 정도로 낮은 것이 되면 帶電電位 約 10 kV 정도가 點火性 放電의 發生限界라고 推定되고 있다. 또한, 支燃性氣體가 空氣가 아니고, 酸素가 되면, 可燃性 氣體가 Propane일 경우에 帶電電位가 6 kV 정도만 넘어도 點火한다고 한다.

한편, 帶電物體가 Film과 같은 表面 帶電物體에서 그 背面에 金屬接地板이 있는 경우는 接地體가 帶電物體에 상당히 접근하지 않으면 放電이 발생하지 않고, 이러한 경우는 일반적으로 접근한 接地體가 點火의 抑制效果로 작용한다. 그 결과 點火에 필요한 Energy는 10^2 배 정도로 크게 되는 수가 있다. 이렇게 接地體가 點火抑制의 效果가 있고, 이것이 接地體에 의하여 변화하므로 보통은 點火爆發의 發生限界가 推定되지 않는다. 단지, 帶電物體에 背面接地 金屬板이 있으면 帶電 電荷密度가 보통보다 크지 않으면 放電이 발생하지 않고 그 電荷密度는 約 $10^{-4} \text{ C}/\text{m}^2$ 이상이 된다고 본다. 따라서 이것을 요약하면, 電荷密度에서는 $1 \times 10^{-4} \text{ C}/\text{m}^2$, 帶電電位에서는 數百 V가 點火爆發의 發生限界가 된다.

이상과 같이 帶電物體가 不導體의 경우에도 點火爆發의 發生限界가 실험적으로 조사되고 있다. 그러나 이것들은 條件이 한정된 경우의 값으로서 推定値에 지나지 않음을 留意할 필요가 있다.

5. 火災·爆發과 관련된 靜電氣 帶電

5.1 導體의 帶電

導體는 接地를 하면 帶電電位가 大地와 거의 等電位가 되므로 點火性 放電이 발생하는 것은 없다. 그러나 過去에 발생한 靜電氣災害 (火災 및 爆發)를 분석하여 보면 2장에도 서술되어 있듯이 災害原因이 導體의 帶電이 아닌 接地가 推定되는 것이 적지 않다. 이것은 導體의 가운데 接地가 곤란한 것이 있거나 導體가 帶電하면 앞에서 서술되어 있듯이 放電 Energy가 크고 點火性 放電이 될 확률이 높은 放電이 발생하기 때문이다.

이렇게 導體는 接地라는 비교적 간단한 방법으로 帶電防止가 가능하지만, 接地되어 있지 않고 絶緣되어 있으면 點火 爆發에 結付되기 쉬운 아주 위험한 帶電物體가 된다. 따라서, 여기서는 災害事例를 참고하여 어떠한 導體의 帶電이 點火爆發에 結부되기 쉬운가에 대해 알아본다.

5.1.1 움직이는 導體의 帶電

可搬形의 金屬製物體, 또는 回轉하고 있는 金屬製物體 등 움직이고 있는 導體들은 常時 接地할 수 없는 것이 많아, 쉽게 災害에 結付될 수 있는 帶電物體가 된다. 例를 들면 絶緣性 Hose 앞에 設置된 金屬製 Pipe, Nozzle 등이 液體의 噴霧 등에 사용되면, 液體와의 摩擦에 의하여 여기에 靜電氣가 帶電하므로 點火性 放電이 발생하는 수가 있다. 또 絶緣物로 된 容器 위에 接地되지 않은 金屬製 Lot, Hopper 등을 사용하여 液體나 粉體 등을 投入하면 金屬製 Lot 등이 點火性 放電을 일으키는 帶電物體가 될 수 있다.

한편, 回轉하고 있는 Roller와 같은 金屬製物體가 Bearing의 潤滑油에 의하여 大地에서 絶緣되거나, 또는 攪拌機와 같은 金屬製物體가 Motor와 絶緣材를 통하여 결합되고 이것이 大地로부터 絶緣될 경우 이 回轉物體에는 靜電氣가 帶電하고 點火性 放電을 일으키는 수가 있다.

이렇게 移動하거나 回轉하는 導體는 接地되어 있지 않거나 接地가 不完全하면 靜電氣의 발생이 많을 때나 周圍의 溫度가 낮을 때는 帶電量이 많게 되고, 이에 따라 點火 爆發에 이를 가능성이 높은 帶電物體가 된다. 또한, 이렇게 常時 接地되지 않는 導體는 接地하는 時機를 잘못하면 이것에 의하여 點火性 放電을 일으키는 수가 있다. 즉, 이 導體가 帶電하고 있는 상태에서 接地를 하면 이때에 Energy가 큰 放電이 발생하게 되므로, 여하간 絶緣되어 있는 導體는 點火源이 될 確率이 높다. 예를 들면 液體, 粉體 등을 運搬하거나 移替할 때에 사용되는 金屬製의 可搬形 容器 등은 接地하여 사용해야 하는데, 만약 接地하는 것을 잊고 作業 도중에 接地를 하면 이미 取扱중인 容器에 靜電氣가 帶電되어 있을 수 있으므로 接地를 하는 것에 의하여 點火性 放電이 일어난다.

이상과 같이 常時 接地할 수 없는 導體는 接地가 안 되어 있거나 不安定하면, 또는 接地 時機를 잘못하면 點火 爆發로 연결되는 帶電物體가 된다. 특히, 導體의 경우는 可搬形과 같이 비교적 작은 것에서도 이것이 帶電하면 點火로 연결될 確率이 높은 帶電物體가 되므로 注意할 필요가 있다.

5.1.2 靜電誘導를 받는 導體

導體가 大地에서 絶緣되고 이것이 帶電物體의 근처에 있거나 高電界 가운데 있으면 導體는 靜電誘導를 받는다. 이 결과, 導體는 帶電物體와 等價가

되어 點火性 放電을 일으킬 수가 있다. 즉, 點火爆發로 結付되기 쉬운 帶電物體와 等價가 되는 것이다. 災害事例의 가운데 導體가 이러한 靜電誘導를 받아 災害가 發生했다고 推定되는 것이 적지 않다.

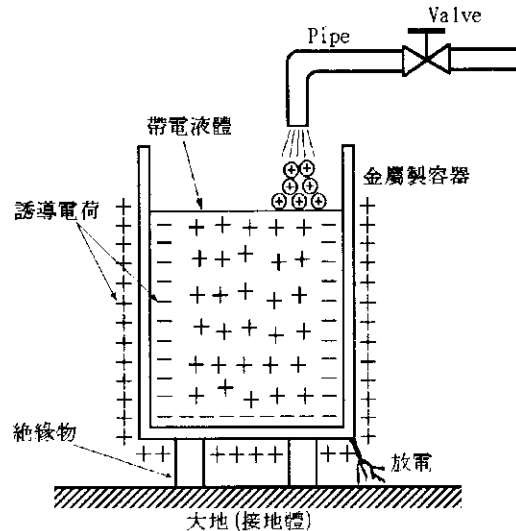


그림 5.1 液體의 帶電에 의하여 靜電誘導를 받는 金屬製 容器

예를 들면 金屬製 容器의 가운데 液體를 充電하면 金屬製 容器가 帶電하지 않더라도 液體에 靜電氣가 帶電하면 金屬製容器는 靜電誘導를 받는다. 그림 5.1는 이것을 나타낸 것으로서, 이 그림과 같이 金屬製 容器의 內面에는 靜電誘導에 의하여 液體의 電荷와 逆極性の 誘導電荷가 그 外面에는 同極性の 誘導電荷가 나타난다. 그 결과 金屬製 容器의 外面과 接地體 사이에서 靜電氣 放電이 發生하는데, 이 放電은 導體에서의 放電이므로 點火性 放電이 된다. 이렇게 導體가 大地에서 絶緣되고 있으면, 이것이 帶電物體에서 靜電誘導를 받고, 이에 따라 點火 爆發이 유발되고 있다. 구체적인 例로서는 導體가 Drum이고 이것에 Filter 통하여 樹脂를 充電할 때 Drum통에서 放電이 발생

하여 火災가 발생한 事例가 있다. 이것은 그림 5.2에도 나타냈듯이 Drum통을 설치한 計量器의 表面에 樹脂가 떨어져 이것이 쌓여 차례로 絶緣被膜을 형성했거나 또는 災害時에 사용한 Drum통이 새 것으로 여기에 칠해져 있는 塗料가 絶緣物인 까닭에 Drum통이 絶緣狀態가 된 것이 원인이다. 즉 Drum통이 帶電한 樹脂에서 靜電誘導를 받고 Drum통과 Pipe 사이에서 放電이 발생하여 일어난 火災이며, Drum통이 接地器具에 의하여 확실하게 接地되어 있으면 災害에 이르지 않았다고 推定되는 事例이다.

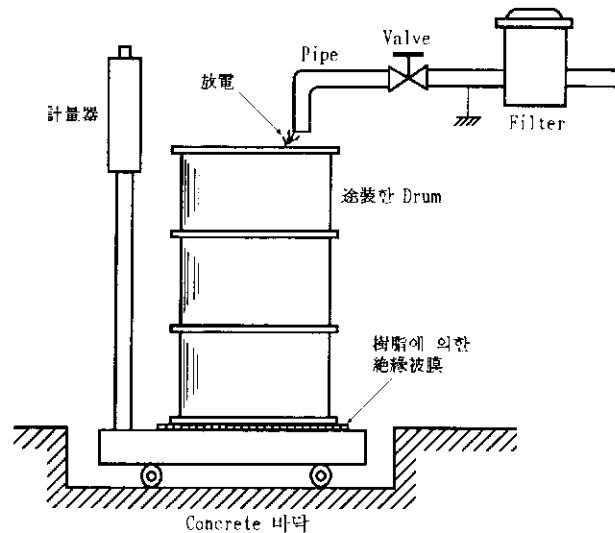


그림 5.2 樹脂의 充電에 의한 Drum통의 帶電 (靜電誘導)

한편, 災害原因으로 結付되기 쉬운 靜電誘導로는 고무바퀴에 의하여 絶緣된 金屬製의 無蓋貨車 (Flatcar)도 같다. 즉, 帶電物體를 無蓋貨車에 쌓아 넣으면 無蓋貨車가 靜電誘導를 받고 이것이 點火爆發로 結付되는 帶電을 하게 된다. 이 경우는 고무만이 無蓋貨車를 絶緣하는 원인이라는 한정할 수 없고 床材가 鹽化 Vinyl과 같은 타일바닥이면 表 5.1에도 나와 있듯이 漏泄抵抗이

크고 이것에 의하여 絶緣되므로 無蓋貨車는 靜電誘導를 받는다. 따라서 帶電物體를 취급하는 金屬製 容器, 無蓋貨車 등은 확실하게 接地가 되는 對策을 마련하지 않으면 이것이 靜電誘導를 받아서 點火 爆發로 연결되는 帶電物體가 될 수 있다.

표 5.1 各種 마루(床)의 漏泄抵抗

마루材의 名稱	漏泄 抵抗 [Ω]
導電性 테라조	$10^5 \sim 10^7$
導電性 고무	$10^4 \sim 10^8$
Concrete	$10^4 \sim 10^9$
導電性 Vinyl	$10^5 \sim 10^{10}$
Paint칠 바닥	$10^7 \sim 10^{11}$
고무	$10^9 \sim 10^{12}$
木材, 木材合板	$10^{10} \sim 10^8$
Asphalt	$10^{11} \sim 10^8$
Vinyl	$10^{12} \sim 10^{15}$

그 외의 靜電誘導의 例로서는 靜電塗裝 등과 같이 帶電한 塗料가 絶緣된 導體에 附着한 경우 絶緣物の 일부에 導體가 사용되어 있고 絶緣物の Hose가 帶電한 경우 등 導體와 帶電物體가 일체가 되어 있어 導體가 靜電誘導를 받는 경우가 있다. 이 경우는 결과적으로 導體의 帶電이 되는 것도 있지만, 여하간에 導體에서 點火性 放電이 발생하여 災害로 연결되고 있다. 靜電塗裝에는 被塗裝物體를 支持하는 臺, 器具 등이 塗裝되고, 이들의 表面에 絶緣被膜이 생겨 이로 인하여 被塗裝物體가 絶緣되면 靜電誘導가 발생한다. 이렇게 導體의 接地가 不安全하면 導體는 靜電誘導를 받아 災害로 연결되는 帶電物體가 되는 것이다.

5.2 人體의 帶電

요즘은 衣服에 化學纖維가 사용되고 신발 바닥에 合成 고무 등 絶緣性이 좋은 것들이 많이 사용되고 있어, 以前보다 많은 靜電氣가 人體에 帶電되기가 쉽다. 또한, 人體는 일종의 導體이므로 放電이 발생하면 이것은 點火 爆發로 연결될 확률이 높은 放電이 된다. 이는 災害分析에 의해서도 명확하고 火災·爆發 災害의 15% 정도는 그 원인이 人體帶電에 있다고 推定된다. 이렇게 人體는 點火 爆發로 연결되기 쉬운 帶電物體이고, 이는 착용하고 있는 의복의 帶電이 原因중의 하나이며, 人體가 신발, 마루 등에 의하여 大地에서 絶緣되고 있으면 人體에 큰 靜電氣가 帶電하기 때문이다.

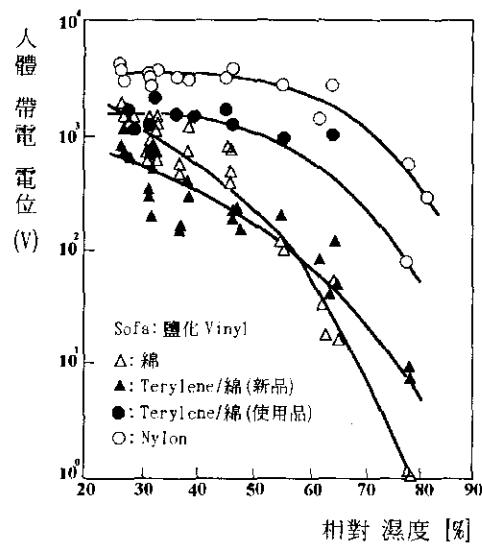


그림 5.3 주변 濕度에 따른 Sofa에서 일어설 때의 人體의 帶電電位

例를 들면 그림 5.3은 人體帶電에 대해서 조사한 일례로서, 이 실험과 같이 人體가 의복을 입은 상태에서 人體 이외의 物體에 접촉하면 이들과의 摩

擦에 의하여 人體에는 數千 V의 靜電氣가 帶電한다. 물론 이 人體帶電은 着用하고 있는 衣服의 素材, 環境條件, 動作 등에 의해서도 변하는 것이고, 이 실험결과도 확정적인 帶電量은 아니다. 그러나 이 實驗이 實驗者의 靜電容量 220 pF인 것을 고려하면, 이 人體帶電은 可燃性 物質의 點火源이 충분히 될 수 있다는 사실을 나타내고 있다. 즉, 이 실험결과와 같이 단순히 Sofa에서 일어서는 動作만으로도 摩擦에 의하여 人體에는 數千 V의 電荷가 帶電하고 水素와 같이 點火 Energy가 작은 可燃性 物質은 물론 Propane, Hexane 등 보통의 可燃性物質도 點火시킬 수 있는 帶電物體가 될 수 있다.

또한, 이 실험결과와 같이 일반적으로는 濕度가 낮게 되면 帶電量이 증대하는 경향이고, 乾燥한 겨울철에는 防寒服 등의 帶電으로 人體가 帶電體가 되는 수가 많다.

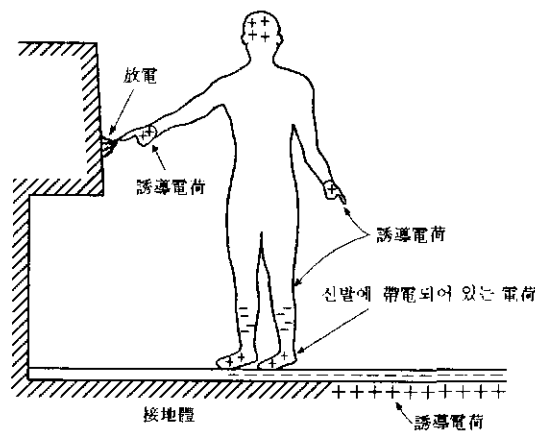


그림 5.4 신발에 帶電하고 있는 電荷의 誘導에 의한 人體의 帶電 및 放電

한편, 人體帶電은 人體와 他 物體와의 摩擦에만 한정하지 않고, 着用하고 있는 衣服類의 摩擦에 의해서도 이 衣服들에 靜電氣가 帶電되어 결과적으로 人體가 帶電하게 된다. 즉, 衣服類의 摩擦에 의해서 正(+), 負(-)의 電荷가 帶

電할 때 속옷에 가까이 있는 電荷는 대부분이 人體로 이동하므로 人體에 靜電氣가 帶電하게 된다. 또, 衣服에 帶電하고 있는 電荷가 人體로 移動하지 않는 경우에도 人體가 絶緣되고 있으면 人體가 이 電荷에 의하여 靜電誘導를 받아 帶電하게 된다. Carpet, 鹽化 Vinyl 등이 깔린 바닥을 보행하면 이 바닥과 신발과의 摩擦에 의하여 신발에 靜電氣가 帶電하는데, 이 경우도 신발에 帶電하고 있는 電荷에 의하여 人體는 靜電誘導를 받는다. 그 결과 人體는 帶電物體와 等價가 되므로 그림 5.4에 나타나어져 있듯이 人體의 일부분, 즉 손가락 등이 接地體에 接近하면 人體에 誘導帶電되어 있는 電荷가 放電하여 人體가 電擊을 받게 되거나 이 放電이 點火源이 되거나 한다. 이것은 감겨진 Film, 자루에 채워진 粉體 등의 帶電物體에 人體가 접근하는 경우도 마찬가지이고, 人體가 絶緣되어 있으면 靜電誘導를 받아 人體는 帶電物體와 等價가 된다.

그밖에 人體의 帶電으로는 Ion, 帶電한 Mist, 粉塵, 粒子 등이 人體에 부착하고 이것에 의하여 人體가 帶電物體가 되는 수도 있다. 粉塵을 취급하고 있는 現場, 또는 塗裝을 하는 現場에서는 帶電한 粉塵, Mist 등이 人體에 부착하여 人體가 帶電하게 되며, 또한 付着하고 있는 粉塵을 空氣로 除去하여 떨어뜨리면 이때 剝離帶電에 의하여 人體가 帶電하게 된다. 剝離帶電으로 인한 人體帶電으로는 衣服의 脫衣도 마찬가지이고, 이것에 의해서 人體 및 벗어는 衣服에도 點火源이 되는 많은 量의 電荷가 帶電할 수 있다. 따라서, 可燃性 物質이 존재하는 장소에서는 衣服을 脫衣하지 않도록 해야 한다. 이것은 脫衣하지 않고서도 단추를 빼놓고 있으면 脫衣와 같이 上衣가 속에 입은 다른 옷에서 떨어질 때 剝離帶電이 일어나서 點火性 放電이 발생할 수도 있다.

5.3 固體의 帶電

高分子物質로 만든 Film, 고무 등은 固有抵抗이 크므로 많은 電荷가 帶電하여 點火爆發의 원인이 되는 수가 있다. 여기서는 이렇게 固有抵抗이 큰 絶緣物이 어떠한 경우에 點火 爆發로 연결되는 帶電物體가 되는지에 대하여 전형적인 것을 알아보기로 한다.

5.3.1 摩擦帶電

異質의 두 固體 物體가 (1) 接觸(Contact)할 때, (2) 接觸하여 서로 摩擦(Rubbing)할 때, (3) 接觸되어 있다가 分離(Separation)할 때는 電荷가 발생하게 된다. 즉, 接觸된 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.

이러한 摩擦帶電은 固有抵抗이 큰 固體 物體에서 잘 일어나는데, 이는 생성된 電荷가 대부분 緩和되지 않고 固體내에서 移動도 하지 않으므로, 摩擦이 繼續 反復되는 것에 의하여 점점 蓄積되어 帶電量이 많아지게 된다. 그 결과, 電荷密度가 10^{-5} C/m^2 정도가 되면, 點火源이 되는 放電을 일으키는 帶電物體가 된다.

物體가 帶電되는 樣相은 Faraday가 처음 제시한바 있는 帶電序列 (Triboelectric Series)에 의하여 결정된다. 표 5.2는 대표적인 物質들의 帶電序列을 나타내고 있다. 이 序列에서 서로 멀리 떨어진 물질간일수록 靜電荷가 많이 발생하며, 序列의 위쪽의 物質이 電子를 잃게 되어 陽(+)으로 帶電되고 아래

쪽의 物質이 電子를 얻어 陰(-)으로 帶電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.

표 5.2 物體의 帶電序列 (Triboelectric Series)

物 質	帶電 極性
石綿 (Asbestos)	陽極 (+)
Acetate	
창유리 (Window Glass)	
毛髮 (Human Hair)	
雲母	
Nylon	
羊毛 (Wool)	
납 (鉛; Lead)	
石英 (Silica)	
絹 (Silk)	
Aluminum	
종이 (Pulp, Paper)	
Polyurethane	
綿 (Cotton)	
木材 (Wood)	
鋼鐵 (Steel)	
Ebonite	
天然고무 (Natural Rubber)	
Epoxy Glass	
Nickel, 銅(Copper), 銀(Silver)	
黃銅 (Brass), Stainless Steel	
硫黃 (Sulphur)	
合成고무	
Acrylic	
Polyester	
Polyethylene	
PVC (Vinyl)	
TEFLON	
Silicone Rubber	陰極 (-)

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.

예를 들면, Film, 종이 등을 Roller에 의하여 驅動하면 그림 5.5에 나타내어져 있듯이 驅動하는 Roller의 壓力이 크게 됨에 따라, 또는 驅動速度가 크게 됨에 따라 點火性放電이 가능한 電荷密度로 帶電한다.

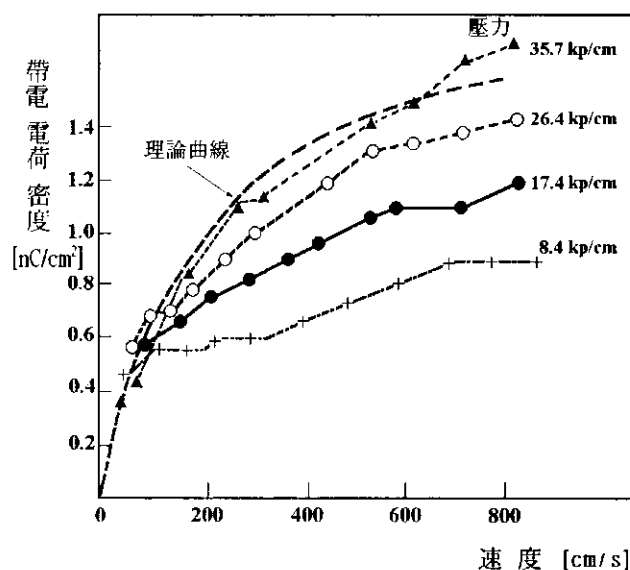


그림 5.5 Roller에 의한 帶電의 한 例

일반적으로 帶電 電荷密度의 飽和値는 그림 5.6에 나타나 있듯이 表面 固有抵抗과 관계가 있고 表面 固有抵抗이 큰 것일수록 點火源이 되기 쉬운 큰 帶電을 한다. 따라서, 이를 回避하기 위해서는 物體의 表面 固有抵抗을 작게 하든가, 驅動速度를 느리게 하든가, 또는 帶電하고 있는 電荷를 除電하든가 하는 對策을 실시하여야 한다. 그러나, 이러한 대책을 실시하여도 點火 爆發에 연결되는 帶電을 하는 것이 있는데, 이는 주로 다음과 같은 경우이다.

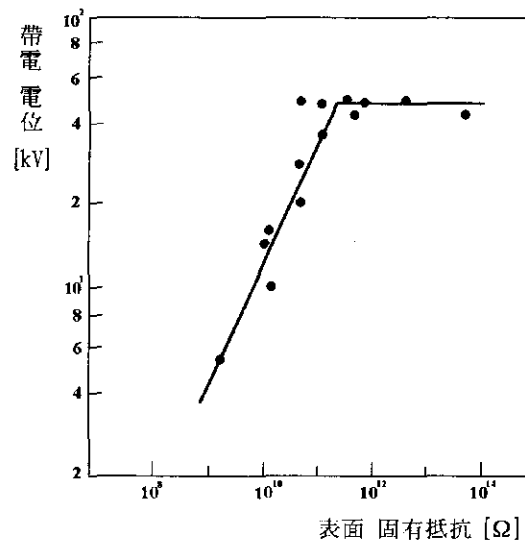


그림 5.6 表面 固有抵抗 및 帯電電位

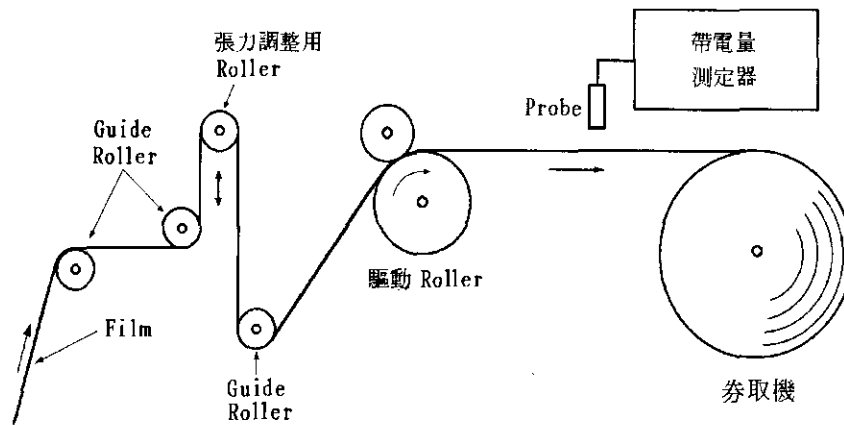


그림 5.7 Roller에 의한 Film의 帯電의 例

첫째는 그림 5.7에 나타나 있는 驅動工程의 경우, 보통의 驅動狀態는 아닌, 張力調整用の Roller가 동작하는 경우, 또는 Film, 종이 등에 이음매가 있는 경우에는 그림 5.8에 나타난 바와 같이 보통 때보다 10배 정도 많은 電荷

가 발생한다. 이렇게 조건을急變하면 帶電量이 크게 되므로 이러한 條件變更의 頻度가 높으면 點火 爆發로 연결되는 電荷가 帶電한다. 이것은 運轉條件의 변경에 한정되지만 않고, 材料의 변경 등도 마찬가지로, 이러한 때는 點火 爆發로 연결되는 큰 電荷가 帶電하게 된다.

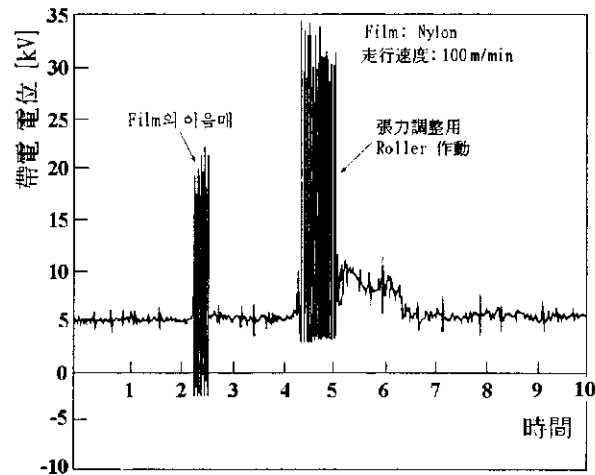


그림 5.8 돌고 있는 Film의 帶電의 한 例

한편, 驅動條件, 材料 등의 변경은 아니고 驅動하고 있는 Film, 종이 등이 찢기거나 이것들이 Roller에 감겨 들어가는 異常狀態가 발생하면, 이러한 경우에도 帶電電荷가 보통 때보다도 많게 되는 수가 있다. 또, Film 등의 驅動은 아니지만 表面을 研磨하는 工程에서도 研磨劑 중에 異物質이 混入된 때, 큰 帶電이 되어 點火 爆發에 結付된 災害事例가 있다.

이상과 같이 點火 爆發에 結付되는 摩擦帶電은 驅動工程에서나 研磨工程에서나 보통 때와는 條件이 달라진 때이다. 따라서, 條件의 變化가 豫測되는 경우에는 그 條件에 따라서 어느 정도의 電荷가 발생하는가를 미리 調査하여 두는 것이 바람직하다.

5.3.2 剝離帶電

密着하고 있는 Film, Tape, 板 등이 剝離될 때에는 큰 電荷密度의 帶電만이 아니라, 일반적으로 剝離할 때에 放電을 동반하고 있어, 點火 爆發에 바로 연결되는 수가 있다. 즉, 剝離帶電은 앞에서 설명한 衣服의 脫衣도 그렇지만 이 경우는 點火 爆發에 연결될 확률이 높은 電荷密度인 10^{-5} C/m^2 이상의 電荷가 帶電한다. 따라서, 일반적으로 單位時間當의 剝離 面積을 작게 하든가, 成型工程에서는 導電率이 큰 離型劑를 사용하고, 表面抵抗을 작게 하는 對策이 강구해야 한다. 그러나, 表面抵抗을 작게 하는 것이 어떠한 경우에도 有效하다고는 할 수 없고, 연속적으로 剝離하고 있을 때는 蓄積이 났다가 큰 放電이 발생하는 수도 있다.

이렇게 剝離帶電은 帶電防止對策의 수립이 곤란한 것도 있어 點火源이 되기 쉬우며, 過去의 災害事例에서도 이러한 剝離帶電에 의한 火災·爆發 災害가 報告되고 있다. 다시 말하면, 剝離 帶電은 帶電防止對策만으로는 災害를 防止할 수 없는 帶電으로서 다음과 같은 剝離가 點火 爆發로 연결되기 쉬운 帶電을 일으키고 있다.

- (1) 剛體와 剛體의 剝離 같이 剝離面積과 速度가 큰 剝離. 예를 들면, 유리板과 Plastic板과의 剝離 등.
- (2) 密着力이 큰 物體의 剝離. 예를 들면, 接着 Tape, 反應容器 壁면에 부착한 樹脂의 剝離 등.
- (3) 剛體와 얇은 被膜, Film 등과의 速度가 큰 剝離. 예를 들면, 유리板에 密着하고 있는 Film을 일시에 剝離하는 경우.
- (4) 마끄러운 表面이 密着하고 있는 것의 剝離. 예를 들면, Ceramics

表面에 密着하고 있는 얇은 Film, 또는 Plastic 表面에 密着하고 있는 고무의 剝離 등.

그 외의 剝離 帶電의 例로서, 풀(Paste)狀의 接着劑 등을 Film에 塗布하는 경우, 그림 5.9에 보여지고 있듯이 이것이 Roller의 表面을 통하여 흘러 나오면 接着材料 등이 Roller에서 떨어지고 Film의 表面에 付着할 때에 剝離帶電을 일으킨다. 이 경우는 帶電한 接着材가 Film에 塗布되므로 결과적으로는 Film이 帶電된다. 이러한 剝離帶電은 印刷工程에서도 일어나고, 잉크에 의해서도 큰 電荷가 帶電하고 있을 수가 있다. 즉, Film 등의 帶電보다도 이것에 塗布된 接着材, 잉크 등의 剝離帶電이 크고, 이것에 의하여 Film도 電荷密度가 큰 帶電物體가 되는 수가 있다. 따라서, 이러한 塗布工程에서는 塗布材의 剝離帶電에 대해서 留意할 필요가 있다.

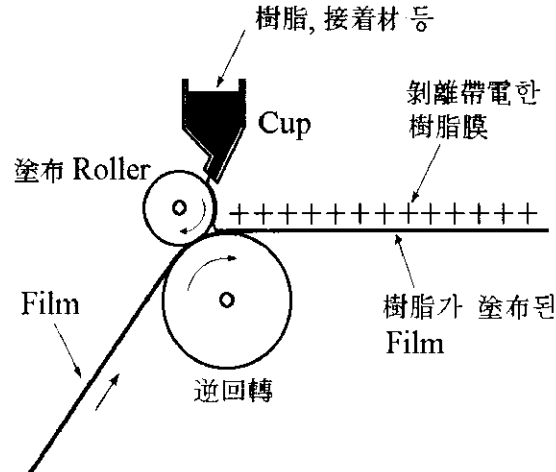


그림 5.9 塗布工程에 대한 接着材 등의 剝離에 의한 Film의 帶電

그밖에 固體物質의 帶電 Mechanism으로 誘導帶電 (Induction Charging)을 들 수 있는데, 이는 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 極性の 電荷가, 먼 쪽에는 같은 極性の 電荷가 모이게 되어 일어나는 現象이다. 이 때 物體가 絶緣되어 있거나, 어느 한 쪽에서 接地 等に 의하여 電荷를 끌어내면 이 物體는 帶電體가 된다.

5.4 粉體의 帶電

粉塵이나 粉體 등은 일반적으로 浮遊狀態가 되는 수가 많으므로, 金屬 粉塵과 같이 固有抵抗의 작은 것들도 큰 帶電을 한다. 또한, 固有抵抗이 작은 金屬粉塵에서도 그 表面은 酸化膜 등에 의하여 表面抵抗이 커질 수도 있고, 일반적으로는 固有抵抗에 관계없이 帶電한다. 단지, 粒徑이 10 μm 면적보다 크면 보통 粉體는 대개의 경우 點火 Energy가 크므로, 粉體의 帶電이 원인이 되어 발생하는 點火 爆發의 確率は 작다. 그러나, 粉體의 粒徑이 작든지, 이것이 可燃性 液體의 蒸氣, Gas를 포함하고 있으면 數百 μJ 정도의 Energy에 의하여 點火하므로 粉體의 帶電이 點火 爆發로 연결된다. 따라서, 여기서는 過去의 災害事例를 參考하여 點火 爆發로 연결되는 粉體의 帶電에 대해서 考察하고자 한다.

5.4.1 摩擦帶電

粉體가 Pipe 속을 흐르거나 Hopper에서 投入되거나 하면 이들과의 摩擦에 의하여 粉體에 靜電氣가 帶電한다. 그러나, 帶電이 되더라도 보통은 空間에서 흩어지거나 하므로 電荷密度가 큰 帶電物體에는 되지 않고, 點火 爆發에 結付되는 경우도 많지 않다. 그러나, 摩擦에 의해서 帶電한 粉體가 일정한 空間에 갇혀 密閉되는 環境에서 취급되면 電荷密度가 크게 되어 點火 爆發로 연

결되는 帶電物體가 될 수 있다.

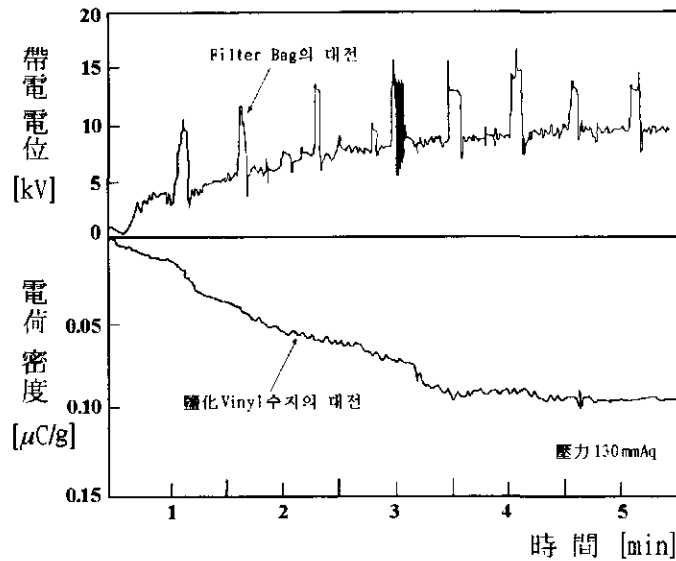


그림 5.10 Filter Bag에 의한 粉體帶電의 例

예를 들면, 그림 5.10에 나타나 있듯이 粉體가 Filter Bag에 의하여 制限된 空間 내에서 流動하면, 粉體는 Filter Bag과의 摩擦에 의하여 帶電하고, 流動時間과 더불어 帶電量이 增加한다. 또, 이러한 취급에서는 摩擦 帶電만이 아니고 Filter Bag에 부착한 粉體가 떨어질 때의 剝離에 의해서도 큰 帶電을 한다. 그 결과 空間內的 粉體 電荷密度가 큰 帶電物體가 된다. 이 例와 같이 粉體가 제한된 空間內에서 多量으로 취급되면 電荷密度가 큰 帶電雲을 형성하여 Filter Bag에 振動을 줄 때 또는 Filter Bag이 찢어지거나 한 부분에 多量の 粉體가 동시에 集中될 때 點火 爆發에 結付되는 放電이 발생한다. 그리고, 粉體의 帶電은 Filter Bag내의 것만이 아니고 이것을 통과한 粉體가 큰 帶電을 할 수도 있다. 이 粉體의 帶電量은 10^{-6} C/g 정도가 될 수도 있는데, 보통은 통과하는 粉體의 量이 적으므로 문제가 되지는 않는다. 그러나, 裝置

의 構造에 따라서 또는 Blower의 故障 등에 의하여 이러한 粉體가 Duct를 포함하여 일정한 空間에 모이게 되면 點火源이 되는 帶電雲을 형성한다.

한편, 粉體가 Hopper, Shutter 등을 통하여 容器, 袋, 反應爐 등에 投入되면 이 때의 摩擦에 의해서도 粉體가 帶電하여 이것이 일정한 空間內에 모이므로 點火 爆發로 연결되는 帶電物體가 된다. 단, 이러한 경우에도 Shutter를 鹽化 Vinyl의 Pipe로 변경한 때, 또는 粉體의 投入중에 反應爐의 攪拌機가 停止한 때, 또는 보통 때와는 다른 條件의 변경이 있었던 때에 火災·爆發 災害가 발생했다. 그리고 어떤 災害事例에서는 1000 kg의 粉體를 Flexible Container Bag에 채우듯이 多量の 帶電 粉體를 일정한 容積內에 모여져서 이것이 帶電物體가 되어 點火 爆發로 연결된 경우가 있다.

5.4.2 破壞 帶電

粒徑이 큰 粉體, 또는 固體를 Hammer Ball Sander 등으로 粉碎하면, 이 때의 破壞, 摩擦에 의하여 粉碎된 粉體에 靜電氣가 帶電한다. 예를 들면, 고무, 硫黃, 樹脂 등을 粉碎하면 이것들에 靜電氣가 帶電하고, 粉碎工程을 거친 粉體는 체 등에서 막힘이 일어나는 경우가 있다. 過去에 發生한 災害에서도 硫黃의 粉碎에서는 破壞 帶電에 의하여 粉塵 爆發이 發生한 바 있어, 硫黃의 境遇는 粉碎하는 것만으로도 點火 爆發로 연결되는 電荷量으로 帶電되는 수가 많다. 따라서, 이 境遇에는 炭酸 Gas 등의 不活性 Gas를 使用하지 않으면 災害를 防止할 수 없는 경우도 있다. 단지, 粉碎하는 硫黃에 水分을 가하여 주면 粉碎에 의한 破壞 帶電이 작게 되어 硫黃의 點火 爆發을 防止할 수가 있다. 이렇게 粉碎에 의한 破壞 帶電에서는 그것만에 의해서도 點火 爆發로 結付되는 帶電을 하는 경우가 많다. 특히, 濕度가 낮게 되면 帶電하고 있는

電荷가 漏泄되지 않으므로 帶電量이 增大함과 더불어 乾燥한 粉體는 작은 Energy에 의해서도 點火되므로, 災害로 結付될 確率이 높아진다.

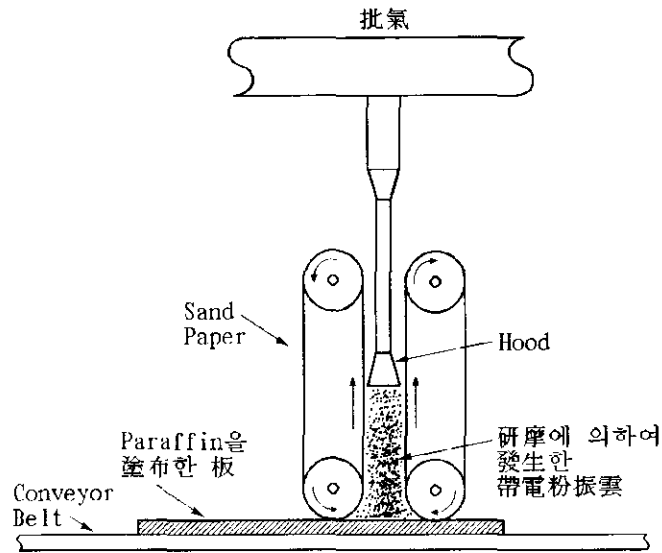


그림 5.11 研磨工程에 의한 帶電粉塵의 發生

한편, 粉碎에 의한 破壞帶電과 비슷한 것으로서 固體의 表面을 研摩하면, 이것에 의하여 粉體가 生成되는데, 여기에 靜電氣가 帶電될 수가 있다. 예를 들면, 그림 5.11에 나타내듯이 Paraffin 膜이 塗布되고 있는 Plate의 表面을 Sand Paper로 研摩하면 이것에 의하여 帶電한 Paraffin의 粉體가 多量으로 發生한다. 이 粉體를 挽氣 Hood를 통하여 排氣할 때, Paraffin의 塗膜이 두껍다든지, 또는 研摩하는 壓力이 크면 Plate가 研摩機에 접촉할 때, 單位時間當의 研摩量이 크게 되어 一時에 多量の 帶電粉體가 發生한다. 그 結果, 排氣가 충분하지 못하면 發生한 粉體가 研摩機의 周邊에 帶電雲을 形成하여 이것이 點火 爆發에 結付되는 帶電物體가 되는 수가 있다. 또한, 이러한 경우는 塗布面에 異物質이 混在하고 있으면, 이것을 研摩할 때에 帶電量이 큰 粉體가 發

生하거나 機械的 불꽃이 發生하여 이것에 의해서도 點火 爆發이 일어난다.

이 밖에 粉體의 帶電으로는 照射帶電 (Ion Beam Charging)을 들 수 있다. 이는 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의 粒子나 空氣 分子와 衝突할 때 放出되는 自由電子가 주변의 粉體粒子나 空氣分子와 結合하여 帶電을 시키는 현상이다.

5.5 液體의 帶電

液體는 可燃性일 경우 帶電物體가 될과 더불어 그 蒸氣는 작은 Energy에 의해서도 點火하는 爆發性 混合氣體로서, 이 液體의 帶電은 매우 危險한 일이 된다. 過去에 發生한 火災·爆發 災害에서도 70%는 可燃性 液體의 蒸氣에 點火된 것으로서 그 點火源이 모두 帶電된 液體에서의 放電 Energy는 아니지만 液體의 帶電에는 세심한 留意를 해야 한다. 또한, 液體는 같은 것이더라도 그 取扱이 다르면, 帶電量이 크게 달라지고 點火 爆發로 연결되는 帶電物體가 될 수 있다. 따라서, 여기서는 어떠한 取扱과 어떠한 條件일 때 點火 爆發로 연결되는 帶電物體가 되는지에 대해서 알아보기로 한다.

5.5.1 流動 帶電

導電率의 작은 液體가 容器내에서 攪拌하거나 配管內를 流動하면 容器 또는 配管과의 摩擦에 의하여 液體에 電荷가 帶電한다. 配管內를 流動할 때의 帶電은 液體의 導電率, 流速, 配管 直徑 등에 依存한다. 例를 들면, 流速이 크면 液體에 點火·爆發에 結付되는 電荷의 帶電이 잘 일어난다. 따라서 液體가 點火 爆發에 結付되는 帶電이 되지 않도록 流速을 制限하거나 帶電防止劑를

添加하여 導電率을 향상시키는 등의 여러 가지 對策이 강구되어야 한다.

이렇게 液體의 取扱에 있어서는 災害防止를 위한 여러 가지 對策이 實施되어야 하고, 取扱方法 등도 잘 教育되어야 한다. 만약 帶電現象에 대한 基本的인 意味를 잘 알고 있지 못하면 예기하지 않은 일이 發生할 때, 靜電氣 對策은 제대로 실행도 되지 않게 되어 그 結果 液體가 點火 爆發로 연결되는 帶電이 발생하게 된다. 예를 들면, 配管보다 直徑이 작은 Hose를 어떠한 事情으로 配管의 端末에 接續했음에도 불구하고 Hose內的 流速을 考慮하지 않고 配管內的 通常 流速의 制限만으로 Pump를 運轉하면, Hose의 距離가 짧아서 이 部分의 流速이 크므로 帶電量이 증가하여, 結果적으로 電荷密度가 큰 液體를 Tank 등에 充電하는 것이 된다. 이러한 경우는 또 直徑이 작은 Hose內的 流速만이 問題가 아니라 配管에 直徑이 다른 部分이 있으면 거기에서 液體의 흐름이 홀트려져 이것에 의해서도 電荷의 發生이 促進된다. 이것은 配管에 설치되어 있는 Pump, 流量計, Valve 등도 마찬가지로서, 이 部分에서 液體의 흐름이 홀트려지므로 보통은 이 部分에 配管部分보다 더 큰 帶電이 일어나게 된다. 液體의 帶電은 配管 內面의 거칠음에도 影響을 받아, 이것이 Flexible Pipe 등과 같이 內面이 平滑하지 않으면 역시 接觸面積과 摩擦이 크게 되어 이 部分에서 內面의 平滑한 配管 部分보다 많은 電荷가 發生한다. 따라서, 流量計를 新設하거나 配管系의 變更 등에 의하여 配管, Valve 등을 增設하면, 또는 液體가 흐르는 中에 Pump, Valve 등의 部分에서 空氣가 들어가고 液體의 흐름이 홀트려지면 보통 때보다 많은 電荷가 液體에 帶電되어 點火 爆發에 結付된다.

한편, 液體의 帶電은 配管系의 流動 帶電 외에 Filter에 의한 帶電이 크고, 이것이 點火 爆發에 結付되기 쉽다. 특히, 근래에는 高分子物質을 素材로 한

Micro Filter가 使用되어 Filter의 性能은 向上되었지만 이것이 반대로 靜電氣의 發生을 促進시켜서 帶電量이 增大하고 있다. 例를 들면 液體가 Filter를 通過하면 그림 5.12에 나와 있듯이 이에 의해서는 配管内의 流動帶電과 비교하여 10~100 倍의 電荷가 發生한다. 또한, 帶電量이 클 때에는 Filter內에서 放電이 發生하는 경우도 있다. 이렇게 Filter에 의해서 많은 電荷가 帶電하여 이러한 液體가 Tank에 充電되면 Tank의 液面 電位는 數十 kV 程度의 電位가 되어 點火 爆發로 연결되는 帶電物體가 된다. 따라서, 過去의 災害事例에서도 Filter의 帶電에 起因되었다고 推定되는 것이 있어, Filter의 素材를 變更했음에도 불구하고 流量 등의 流送 條件은 바뀌기 전과 다름없이, 帶電量을 確認하지 않고 흘려보내면 災害에 이룰 수가 있다.

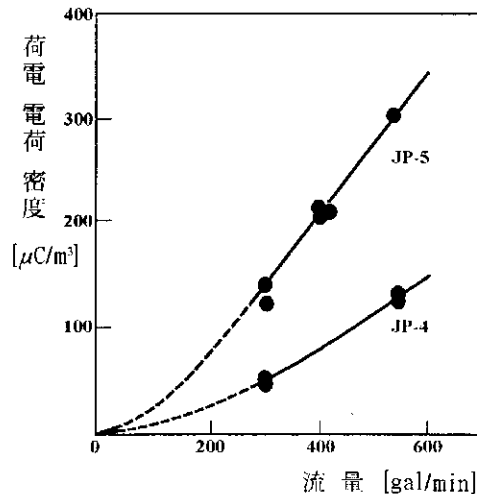


그림 5.12 Filter에 의한 帶電의 例

그밖에, 點火 爆發에 結付되기 쉬운 帶電으로서는 液體를 攪拌, 또는 2種以上の 液體를 混合할 때 일어나는 帶電을 들 수 있다. 이것은 液體가 攪拌 날개와 容器의 內面과 摩擦하는 것에 의하여 帶電하는 것인데, 攪拌, 混合에

서는 氣泡, 異物質이 들어가거나 Colloid 등이 있으면 이것이 帶電을 促進시킨다. 그리고 이것들이 攪拌날개의 軸이든가, 또는 容器内壁의 圓周상에 모이면 이것이 電荷密度와 큰 帶電物體를 形成하여 이로 因한 災害가 發生하는 수가 있다. 이것은 輸送 등에 의하여 液體가 振動한 경우도 같고, 液體 中에 異物質이 있으면 이것이 振動에 의하여 帶電한 후 容器 한 부분에 모여 電荷密度가 큰 電荷物體를 形成한다. 따라서, 大型容器에 의한 輸送 등에서 容器 사이사이에 칸막이 板이 없으면 電荷密度가 큰 部分이 廣範圍에 걸쳐 生成되어 點火 爆發에 結付되는 帶電物體가 되기 쉽다.

5.5.2 噴出·衝突 帶電

液體가 Nozzle, Pipe 등을 통하여 空間에 噴出되면 液體에는 이것들과의 衝突 및 摩擦에 의하여 電荷가 생성된다. 또한, 噴出한 液體의 一部는 흔히 미세한 飛散 泡沫이 되어 空間에 浮遊하여 帶電雲을 形成한다. 이 帶電雲도 點火 爆發에 結付되기 쉬운 帶電物體의 하나로서 一般的으로는 帶電 Mist의 浮遊하는 空間이 크면, 電荷量도 크게 되므로 災害의 原因이 되는 수가 많다. 이러한 帶電은 液體가 構造物에 衝突할 때도 같다. 즉, 液體가 衝突에 의하여 帶電함과 더불어 이때에 飛散 泡沫이 帶電雲을 形成하여 點火 爆發에 結付되는 帶電物體가 된다.

이렇게 液體는 噴出과 衝突에 의하여 帶電하고, 또한 이때에 飛散한 Mist가 帶電雲을 形成한다. 이 帶電雲은 空間에 形成되므로 導電率이 큰 물(水)과 같은 液體에서도 點火 爆發에 結付되는 帶電物體가 된다. 예를 들면, 그림 5.13에 나와 있듯이 大型 Tanker의 船艙을 海水로 청소할 때, 海水가 높은 壓力으로 Nozzle에서 噴射되면 이 海水는 帶電 Mist가 되어 船艙內에 廣範圍

한 帶電雲을 形成한다. 또한, 船艙의 壁에 衝突한 海水도 Mist가 되어 帶電雲을 형성한다.

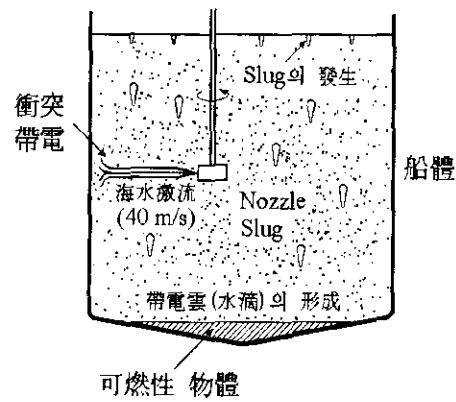


그림 5.13 Tanker의 清掃에 의한 帶電 및 Slug의 形成

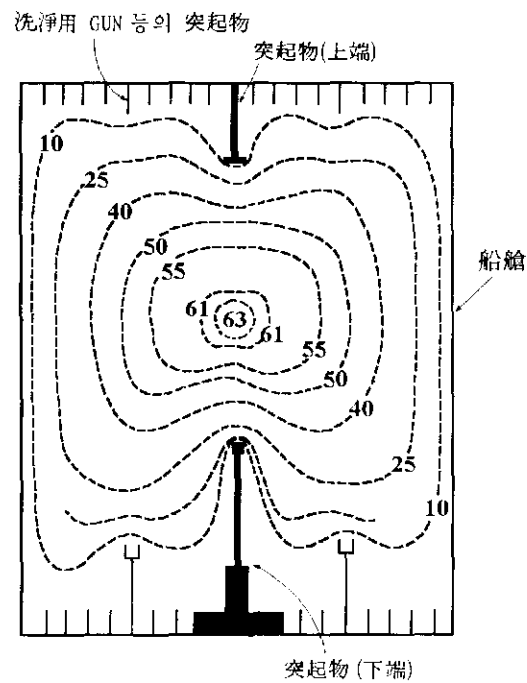


그림 5.14 大型 Tanker의 船艙内の 電位分布 (單位: kV)

이 帶電雲은 實驗에 의하면 그림 5.14에 나와 있듯이 船艙內의 突起 部分 등에 큰 電界를 만드는 것이 確認되었고, 앞서서와 같은 帶電雲에서 點火性 放電이 發生하여 Tanker가 爆發하게 되는 災害를 일으키고 있다.

또한, 이러한 Tanker의 清掃에서는 船艙內의 天井 등에 附着하고 있던 海水가 落下하면서 큰 것은 길이가 30 cm 程度가 되는 Slug라는 水柱 (물기둥)가 된다. 이 Slug는 落下時의 剝離에 의해서, 또 帶電雲 가운데를 落下하므로 그림 5.15에 나타나 있듯이 이것이 電荷密度가 큰 帶電을 하는 외에 帶電雲에서 靜電誘導도 받아 큰 帶電物體가 된다. 그 結果, 이것이 接地體에 接近하면 點火性 放電이 發生하고, 이에 따라 爆發이 일어날 수 있다.

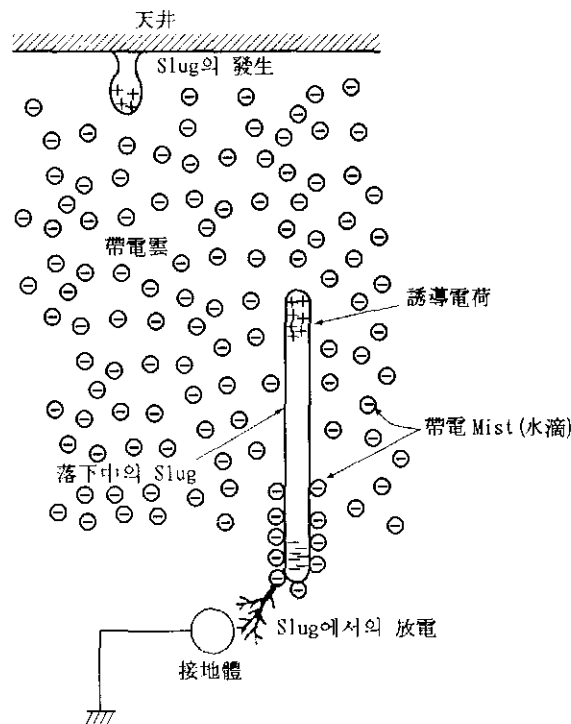


그림 5.15 Slug에서의 點火性 放電의 發生

한편, 液體를 Tank 등에 充電 또는 移替를 할 때, 充電用의 Pipe를 Tank의 바닥까지 내리지 말고 Tank의 上部 또는 中途 空間에서 液體를 充電하면 바닥에서의 充電과 比較하여 많은 電荷가 發生하고 點火 爆發에 結付되는 수가 있다. 예를 들면 그림 5.16는 바닥에서의 充電과 上部 空間에서의 充電에 대해서 電荷의 發生量을 比較한 것인데, 이 實驗結果와 같이 空間에서 液體를 充電하면 液體에는 많은 電荷가 帶電하고, 그만큼 點火源이 되기 쉬운 것을 보여주고 있다. 따라서, 災害事例에서도 液體가 空間에 噴出할 때, 配管의 Flange 部分에서 噴出할 때, 또는 Nozzle에서 高壓 水蒸氣를 噴射하고, Gas 등의 Purge를 할 때 등 液體를 空間에 噴射한 境遇에 災害를 誘發하는 일이 많다. 특히, 水蒸氣는 그림 5.17에 나타나 있듯이 靜電氣가 帶電하기 쉽고, 空間에 噴出한 境遇는 帶電雲을 形成하므로 이것이 點火 爆發에 結付되는 帶電物體가 된다.

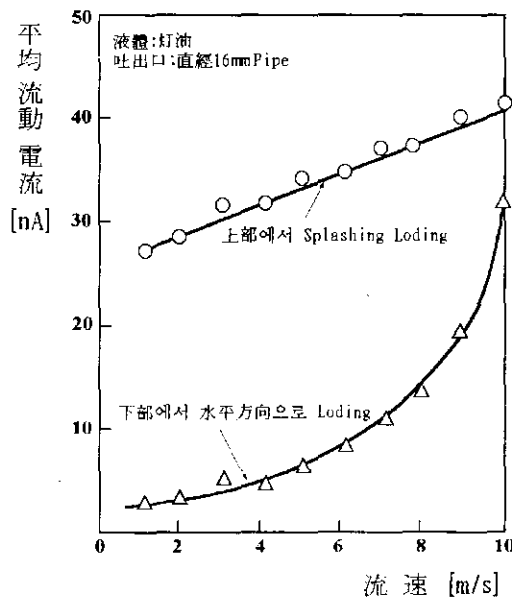


그림 5.16 充電方法의 差異에 따라 帶電量이 相違한 例

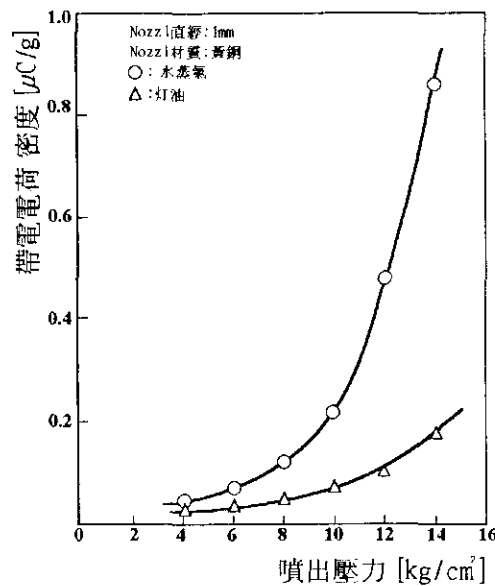


그림 5.17 噴出壓力 變化에 따른 帶電密度 變化의 例

또한, 液體는 導電率이 큰 것에서도 이것이 構造物에서 剝離하여 液滴이 되어 空間을 落下하면, 直徑 1 mm 가량의 液滴에 $10^{-9} \sim 10^{-8}$ C 程度의 電荷가 帶電된다. 따라서, 多數의 液滴이 空間을 落下하면 電荷密度가 큰 帶電雲을 形成하고, 點火 爆發에 結付되는 帶電物體가 된다. 특히, 이러한 液滴이 3m^3 程度 以上の 넓은 空間을 落下하면, 廣範圍한 帶電雲이 形成되므로 災害와 結부되는 帶電物體가 된다.

그밖에 點火 爆發에 結付되기 쉬운 噴出 帶電으로서 液化 Gas의 噴出도 들 수 있으며, 이때에 完全하게 Gas化 하지 않은 液滴이 포함되어 있으면, 이것이 摩擦에 의하여 큰 帶電을 하게 된다. 또한, 이 境遇는 液化 Gas가 噴出한 空間에 안개 (霧) 또는 氷片이 생겨나 이것이 帶電하여 噴出한 液滴과 더불어 帶電雲을 形成한다. 過去의 災害事例를 보면, 液化炭酸 Gas의 噴出에 의하여 Dry Ice의 帶電雲이 생겨나 이것이 Gasoline (揮發油) 蒸氣의 點火源

이 되어 發生한 災害가 있다. 이 以外에도 液化 Gas의 噴出에서는 Bombe (圓筒容器)의 바닥에 있던 물이 液體 Gas와 더불어 噴出할 때, 또는 Gas化가 충분히 되지 않은 채 液滴이 많이 噴出될 때에 帶電雲을 형성하여 點火 爆發을 일으키고 있다. 따라서, 液化 Gas의 噴出에서도 이것에 異物質이 混入하든가, Gas化가 충분하지 않으면 點火 爆發에 結付되는 帶電物體를 形成하기 쉽다.

6. 靜電氣 관련 特性實驗 및 點火·爆發 實驗裝置 設置

靜電氣 豫防對策을 講究하기 위해서는 材料의 靜電氣 관련 諸般 特性을 파악하는 것이 무엇보다도 중요하다. 이 章에서는 이의 일환으로서 시중에서 널리 사용되고 있는 帶電防止 處理가 된 材料와 處理가 되지 않은 一般材料에 대하여 靜電氣의 帶電 및 緩和 特性 實驗을 실시하고 그 結果를 比較 分析하였다. 또한, 본 章에서는 靜電氣가 放電할 때 放出하는 放電 Energy에 의하여 여러 가지 爆發性 混合氣體의 爆發實驗을 실시하기 위한 實驗裝置를 개발하여 이를 소개하고자 한다. 이 장치는 향후 靜電氣 放電에 의한 爆發性 混合氣體의 特性을 파악하는데 있어 매우 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

6.1 靜電氣 관련 特性實驗을 위한 實驗裝置

不導體는 앞의 5章에서 살펴본 바와 같이 摩擦 등에 의하여 帶電이 잘 일어나고, 電路가 형성될 경우 放電한다. 5章의 표 5.1 (Faraday의 帶電序列)에 나와 있는 物質들 가운데 시중에서 널리 사용되고 있는 帶電防止處理가 된 材料와 되지 않은 一般材料를 선별하여 靜電氣 帶電 및 緩和 特性 實驗을 실시하고 그 結果를 比較 分析하였다.

6.1.1 固體材料의 靜電氣 特性 實驗裝置

본 실험에 사용된 주요 實驗裝置로는 靜電氣를 發生시켜 주는 Static Honestmeter (일본 Shishido 靜電氣株式會社 製品 Model S-5109), 物質의

帶電電壓을 측정하는 Electrostatic Voltmeter (E.T.S.社. 製品 Model 105), 필요한 溫·濕度 環境條件을 만들어 주는 恒溫恒濕器 (熱電子工業株式會社 製品 Model THC-150S), 試料의 表面抵抗을 測定하는 表面抵抗器 (Shishido 靜電氣株式會社, 製品 Model RF-250), 각 物質에 既 帶電되어 있는 靜電氣를 제거시켜 주는 送風型除電器 (新韓靜電氣株式會社. 製品 Model SS-3000), 靜電氣 緩和特性을 測定하는 Static Decay Meter (E.T.S.社 製品 Model 4060) 등이다.

여기서는 주요한 장비 몇가지만 골라 圖示하고자 하며, 먼저 固體物質의 表面抵抗을 측정하기 위하여 사용한 Floor Ohm Meter는 그림 6.1에 보여지는 바와 같다.

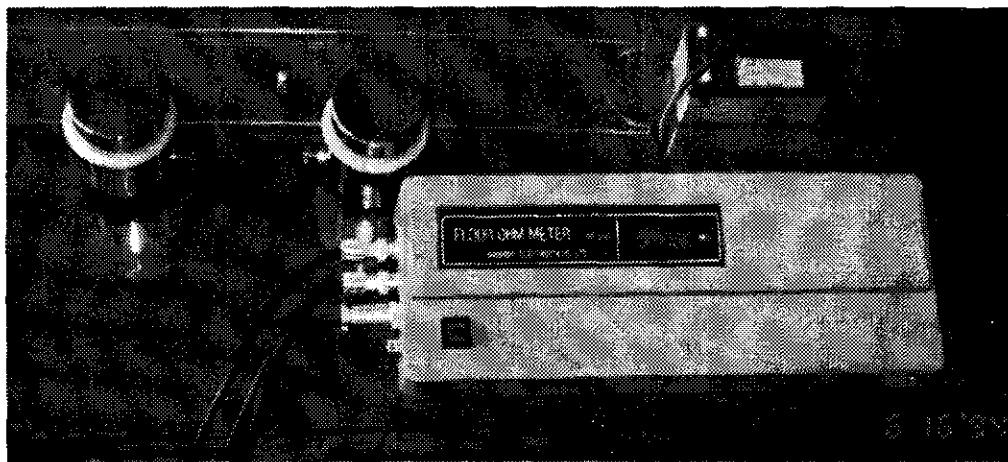
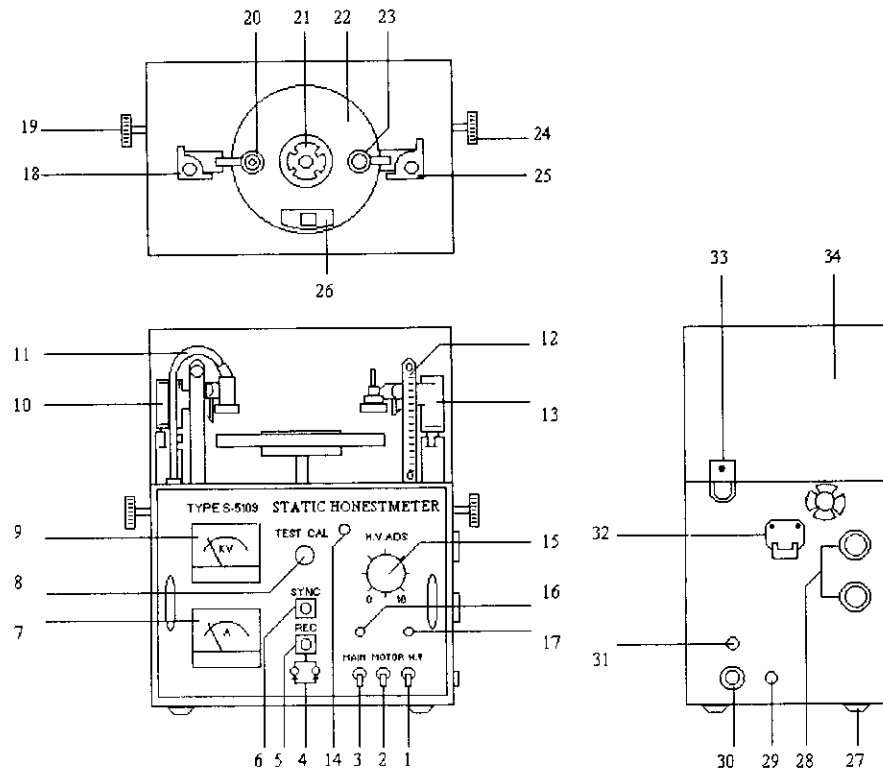


그림 6.1 表面抵抗 測定에 사용하는 Floor Ohm Meter

靜電氣를 발생시켜 固體物質의 帶電實驗을 실시하는데 사용한 Static Honestmeter의 3 方向에서 본 投影圖는 그림 6.2에 나타내져 있다.



- | | | |
|-------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| 1. High-voltage switch | 12. Dial | 23. Driver (Charge electrode) |
| 2. Motor drive switch | 13. Drive arm | 24. Driver vertical handle |
| 3. Main switch | 14. CAL indicator lamp | 25. Driver positioning plate |
| 4. Recorder output | 15. Voltage control knob | 26. Specimen holder |
| 5. Same as above | 16. Main lamp | 27. Rubber caster |
| 6. Output terminal for synchroscope | 17. High-voltage indicator | 28. High-voltage output terminal |
| 7. Ammeter | 18. Receiver positioning plate | 29. Ground terminal |
| 8. TEST/CAL selector switch | 19. Receiver vertical handle | 30. Power connector |
| 9. Voltmeter | 20. Receiver | 31. Fuse |
| 10. Receiver arm | 21. Specimen mounting handle | 32. Handle |
| 11. Probe | 22. Turntable | 33. Padlock |
| | | 34. Case cover |

그림 6.2 Static Honestmeter의 構成圖

6.1.2 混合氣體의 點火爆發 實驗裝置

靜電氣 爆發實驗裝置는 우선 爆發性 混合氣體를 密封하여 가둘 수 있는 유리통이 필요하다. 이 유리통내에는 放電電極을 설치하여 이를 통하여 帶電

된 靜電氣 電荷를 불꽃放電 시킬 수 있게 되어 있다 (그림 6.3; 이하 폭발통으로 부르기로 한다.). 유리통의 재료는 폭발압력에 견딜 수 있는 강한 Pyrex 유리를 사용하였고 투명하여 외부에서 放電現象 및 爆發過程을 쉽게 관찰할 수 있도록 하였다.

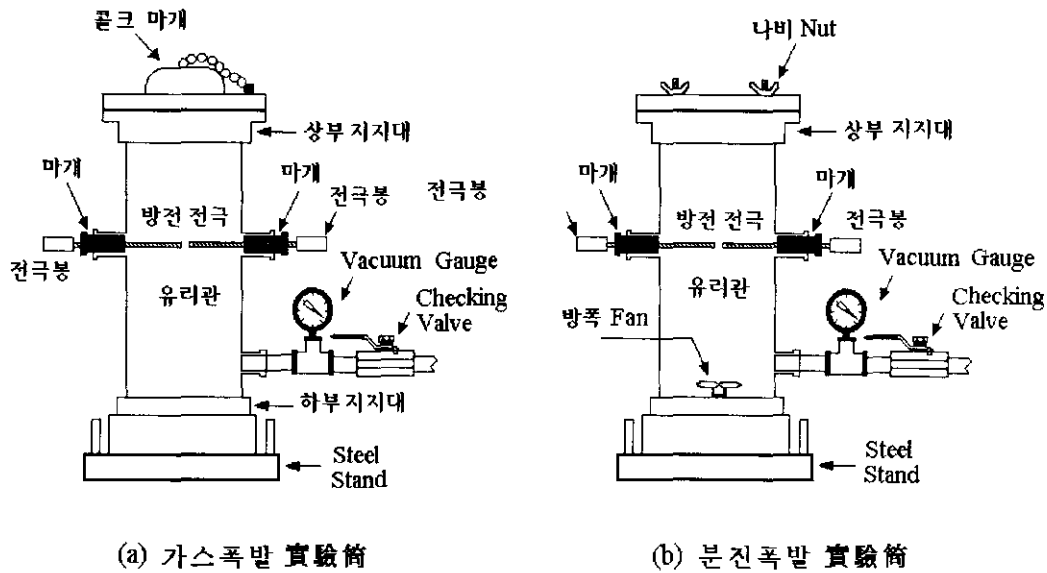


그림 6.3 放電電極이 내장된 爆發筒의 正面圖

폭발통은 유리창문이 달린 鐵材 Box안에 넣어 安全性을 높였으며 Box 밖에서 모든 조작이 가능하도록 제작하였다 (그림 6.4).

폭발통에 들어 있는 混合氣體는 放電電極에서 발생하는 放電 Energy에 의하여 點火 爆發하게 되는데 이 Energy는 그림 6.5에서 보여지고 있는 Electrostatic Discharge Simulator를 통하여 供給시켜 준다. 이 Electrostatic Discharge Simulator의 機能을 나타내는 Block Diagram은 그림 6.6과 같다.

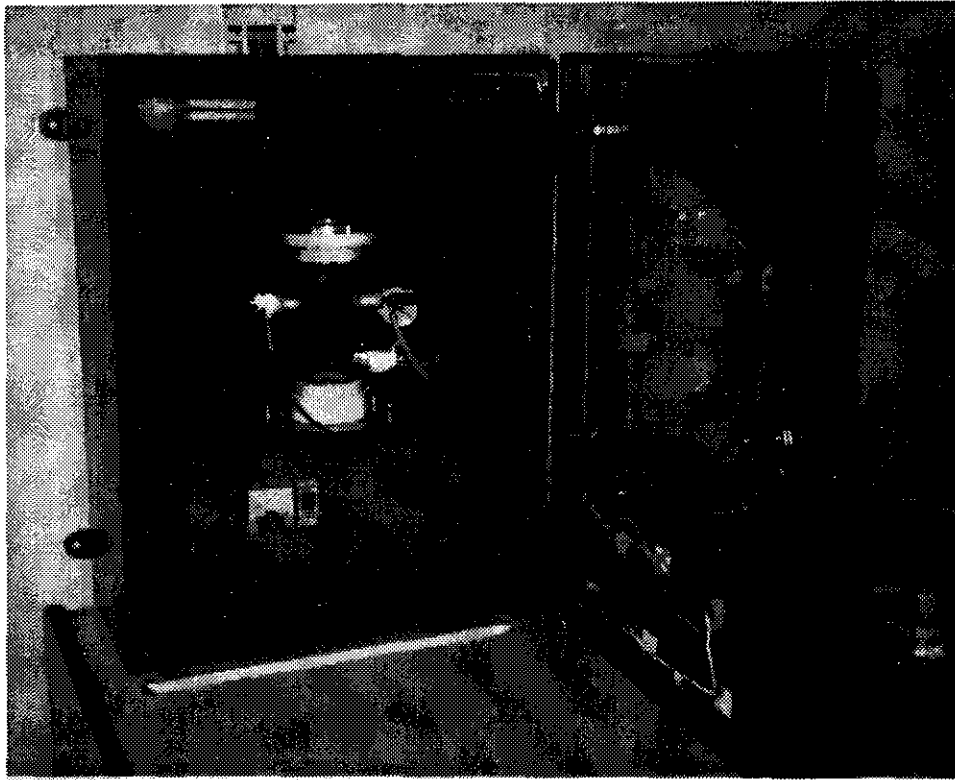


그림 6.4 爆發筒이 들어 있는 靜電氣 點火爆發 實驗槽

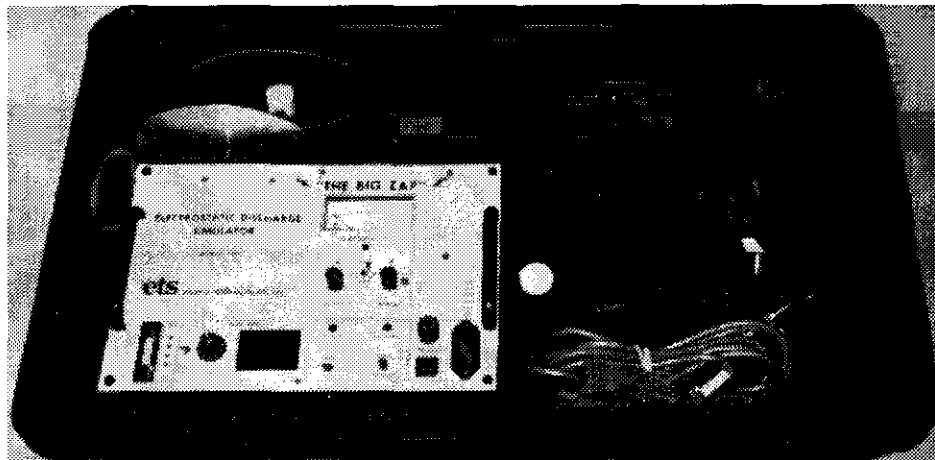


그림 6.5 Electrostatic Discharge Simulator
(Electro-Tech Systems, Inc., Model 930C)

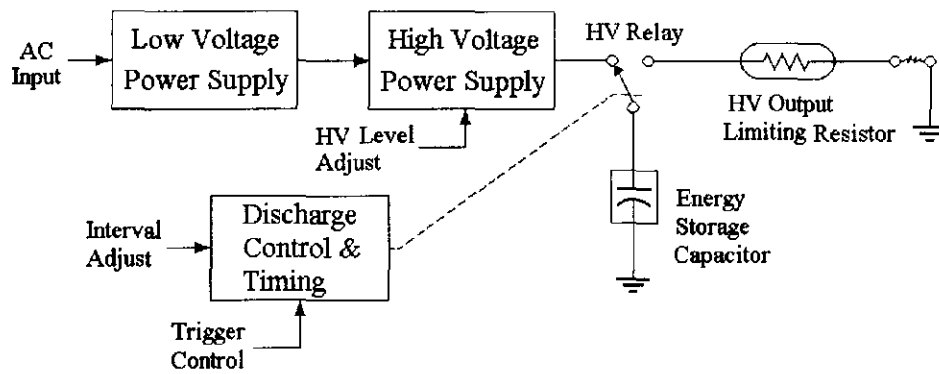


그림 6.6 Electrostatic Discharge Simulator의 機能圖

본 研究에서는 混合氣體의 靜電氣 點火爆發 實驗을 위한 System을 開發하여 設置하였는데, 이 點火爆發 System을 Block Diagram으로 나타내면 그림 6.7과 같다.

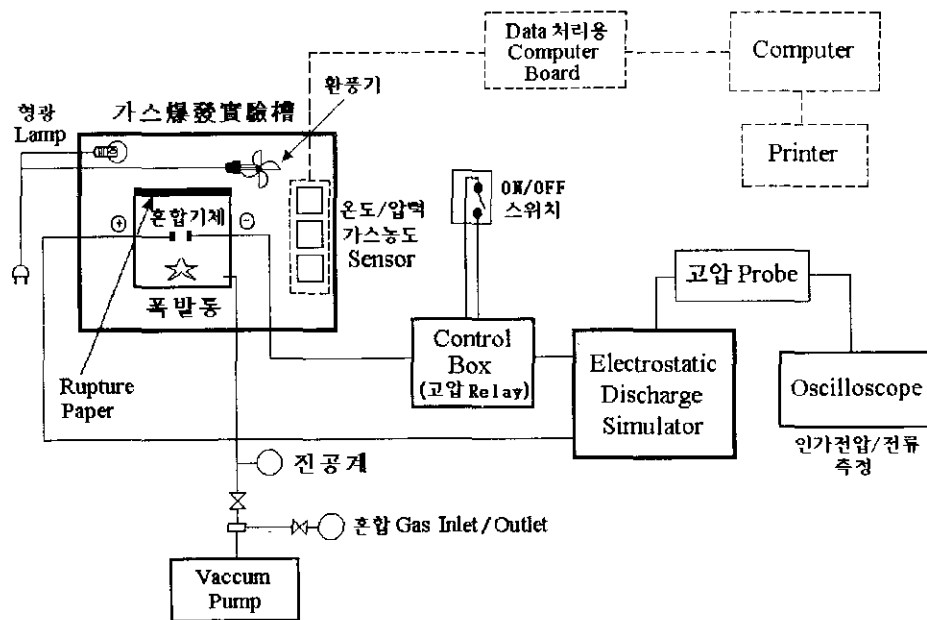


그림 6.7 爆發實驗裝置의 概念圖

그림 6.7에서 점선 부분은 앞으로 補完하여야 할 裝置들로서, PC를 Data Aquisition System을 통하여 接續시켜, 實驗條件을 記錄하고 實驗結果를 自動 處理하기 위한 것이다.

이 實驗은 爆發筒에 混合氣體를 充填시킨 후 帶電된 電荷를 放電電極에 誘導시켜 放電토록 하여 混合氣體의 爆發 여부를 관찰하고, 爆發할 경우에는 이 때 必要로 하는 點火 Energy를 推定해 낸다.

6.2 實驗 實施

6.2.1 試料 製作

이 測定을 위해서는 먼저 여러 가지 材料들을 구하여 Honestmcter의 홈에 맞도록 절단하여 Sample을 만들었다. 본 實驗對象이 된 試料는 시중에서 널리 사용되고 있는 帶電防止處理가 된 Acryl, 고무, Film, Carpet, Sponge, Vinyl 등으로서 비교를 위하여 이들과 두께가 비슷한 帶電防止處理가 같은 종류의 材料를 선정하여 實驗測定用 試料를 製作하였다. 각 測定用 試料에 대한 크기는 표 6.1과 같다.

표 6.1 主要 試料의 크기 (가로 × 세로 × 두께)
(單位: mm)

區 分	帶電防止處理 試料	一般 試料
Acryl	50 × 50 × 5	50 × 50 × 5
고 무	50 × 50 × 2.32	50 × 50 × 2.54
Film	50 × 50 × 0.22	50 × 50 × 0.19
Carpet	50 × 50 × 1.68	50 × 50 × 1.52
Sponge	50 × 50 × 5.21	50 × 50 × 5.10
Vinyl	50 × 50 × 0.06	50 × 50 × 0.06

6.2.2 實驗 方法 및 節次

(1) 表面抵抗 測定

각 試料의 表面抵抗 測定方法은 送風型除電器를 사용하여 試料 表面에 既帶電되어 있던 靜電氣 및 試料 周邊의 靜電氣를 除去시킨 후 溫度 24℃, 相對濕度 62%에서 각 試料 (크기 500mm × 100mm) 위에 表面抵抗器 Sensor를 올려 놓고 1분이 지난 후에 試料의 表面抵抗을 測定하였다.

(2) 固體物質의 靜電氣 帶電特性 測定

각 Sample은 測定實驗전에 除電器를 사용하여 소량이라도 이미 帶電되어 있는 靜電氣를 제거하였다. 그리고 溫度 및 濕도가 帶電에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 恒溫恒濕槽에 이 裝置를 설치하여 溫度 및 濕도를 변화시켜 가며 測定하였다.

常溫에서 帶電防止 處理物質과 一般物質들의 帶電電壓을 測定하기 위하여 각 試料들을 洗滌劑로 깨끗이 洗滌한 후 30분간 乾燥시켜 送風型 除電器로 試料 表面에 既 帶電되어 있는 靜電氣를 除去시킨 후 試料를 Static Honestmeter의 Turn Table에 부착되어 있는 Specimen Holder 속에 놓고 1,550 rpm의 速度로 回轉運動시키면서 試料에다 9 kV의 高壓으로 2분간 帶電을 시킨 다음 試料를 Specimen Holder에서 꺼내어 Electrostatic Voltmeter로 각 試料의 帶電電壓을 測定하였다. 이러한 실험을 4回 反復한 후 그 測定값을 平均하였다.

環境變化에 따른 物質들의 帶電電壓을 測定하기 위하여 恒溫恒濕器를 이용하였다. 이 때 실험에 사용된 試料는 帶電防止處理된 Acryl, 고무, Film과 帶電防止處理가 되지 않은 Acryl, 고무, Film으로서, 위에서 기술한 方法으로

帶電電壓을 測定하였다.

環境變化로서는 먼저 溫度를 20℃로 一定하게 維持하면서 濕度를 20%에서 80%까지 10%의 간격으로 變化를 주어 가면서 濕度變化에 따른 각 物質들의 帶電電壓을 測定하였다. 다음에 濕度를 40%로 一定하게 維持하면서 溫度를 -20℃에서 40℃까지 10℃ 간격으로 變化시켜 가면서 溫度變化에 따른 각 物質들의 帶電電壓을 測定하였다. 이 實驗도 4回 反復 實施하여 그 平均값을 取했다.

(3) 固體物質의 靜電氣 緩和特性 測定

각 物質의 靜電氣 緩和特性을 測定하기 위하여 Static Decay Meter를 이용하여 溫度 20℃, 相對濕度 60%에서 試料에 5kV의 電壓을 인가하여 靜電氣가 0%까지 緩和되는 時間을 測定하였다.

(4) 混合氣體의 點火·爆發 實驗

본 研究의 일환으로 考案·設計하여 設置한 爆發實驗裝置를 이용하여 混合氣體의 點火·爆發 實驗을 실시하였다. 이를 위하여 防爆檢定試驗室에서 爆發性 混合氣體를 만들어서 이를 옮겨다 넣고 실험하였다. Electrostatic Discharge Simulator를 이용하여 放電電極에 連結된 導體에 點火 Energy를 印加하여 Gas를 爆發시키며, 이 때의 點火 Energy를 측정하였다.

폭발통에 Gas를 充塡시키기 위해서는 먼저 폭발통을 眞空 Pump를 이용하여 眞空으로 만들어야 하는데 Rupture Paper의 不完全性으로 인하여 충분한 眞空狀態로 만드는 것이 어려웠다.

본 연구중에는 다양한 混合氣體의 點火 Energy를 측정하기 위한 상세한

實驗은 실시하지 못하고, 開發 製作한 爆發實驗裝置의 性能을 확인하는 정도
로 만족해야 했다. 향후 본 實驗裝置를 계속 補完하여 混合氣體 및 粉塵의
靜電氣 放電에 의한 點火·爆發 實驗을 실시하는데 사용할 계획이다.

6.3 實驗結果 및 考察

6.3.1 固體物質의 表面抵抗 測定

固體物質에서 表面抵抗과 靜電氣 帶電은 매우 깊은 관계가 있다. 즉, 固體
物體의 表面抵抗을 낮게 하고 이를 적절하게 接地시키면 발생되는 電荷를 쉽
게 漏泄시켜 靜電氣의 帶電을 방지할 수 있다. 그러나 感電을 예방하기 위하
여 絶緣을 필요로 하는 등 다른 制約狀況 때문에 表面抵抗을 무조건 낮출 수
는 없다. 보통 表面抵抗이 $10^6\Omega$ 이하로 유지하면 靜電氣가 物體表面에 蓄積
되어 帶電되는 것을 防止할 수 있다.

표 6.2 物質의 表面抵抗 測定값
(單位: MΩ)

試料名	帶電防止 處理物質	一般 物質
Acryl	2.85	∞
고 부	26.00	∞
Film	0.07	∞
Carpet	0.05	∞
Vinyl	23.00	∞
Sponge	0.40	∞

표 6.2는 이 실험에 사용된 물질들의 表面抵抗을 溫度 24℃, 相對濕度

62%에서 測定하여 나타낸 것이다. 帶電防止 處理가 안 된 一般物質들은 表面抵抗이 測定器의 測定範圍밖으로 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 帶電防止 處理된 物質들도 고무와 Vinyl은 수십 MΩ으로 매우 높게 나타나고 있어 靜電氣 帶電防止 物質로 사용하기에는 문제가 있는 것으로 보인다. Film, Carpet 및 Sponge는 적합한 것으로 나타났으며, Acryl은 帶電防止 處理가 미흡한 것으로 나타났다.

不導體에 表面抵抗을 減少시키기 위한 방법으로는 物體에 導電性物質을 插入한다든지 導電性 塗料를 칠하는 것 등이 있다. 상세한 사항은 [1] 등의 資料를 참고하기 바란다.

6.3.2 固體物質의 帶電特性

(1) 同一 環境에서의 物質別 帶電特性 比較

溫度 33℃, 相對濕度 57%에서 帶電防止處理 物質과 帶電防止處理가 되지 않은 一般物質을 Static Honcstmeter에서 9 kV의 高壓을 (+) 電極 및 (-) 電極에 각각 인가하여 帶電電位를 測定한 결과를 표 6.3에 나타냈다. 여기서 (+) 電極으로 帶電시킨 帶電防止處理 物質과 一般物質의 帶電電壓을 비교한 결과 Carpet인 경우에는 一般 Carpet가 6.13 kV이며, 帶電防止處理된 Carpet는 0.08 kV로 나타나 一般 Carpet가 帶電防止 處理된 Carpet보다 약 70배 정도 높게 나타났다. Film인 경우는 一般 Film이 33 kV, 帶電防止 處理된 Film이 0.06 kV로 나타나 一般 Film이 帶電防止 處理된 Film보다 약 550배 높은 것으로 나타났다. 따라서, 帶電防止 處理된 物質은 一般物質보다 靜電氣의 帶電이 매우 낮게 된다는 사실을 확인할 수가 있었다.

표 6.3 主要 物質들의 帶電電壓 測定값
(溫度 33℃, 濕度 57%에서 2분간 帶電후 測定; 單位: kV)

物質名	帶電防止處理 試料		一般 試料	
	(+) 帶電	(-) 帶電	(+) 帶電	(-) 帶電
천	0.05	0.05	0.25	-0.30
타 일	12.00	-5.00	30.00	-15.00
Acryl	0.06	0.05	15.00	-25.00
고 무	0.08	0.05	5.00	-16.50
Film	0.06	0.07	30.00	-8.00
Carpet	0.06	0.05	8.00	-1.25
Vinyl	0.075	0.075	10.00	-7.50
Sponge	0.08	0.05	10.00	-17.50
종 이	0.15	-0.10	0.20	-0.20

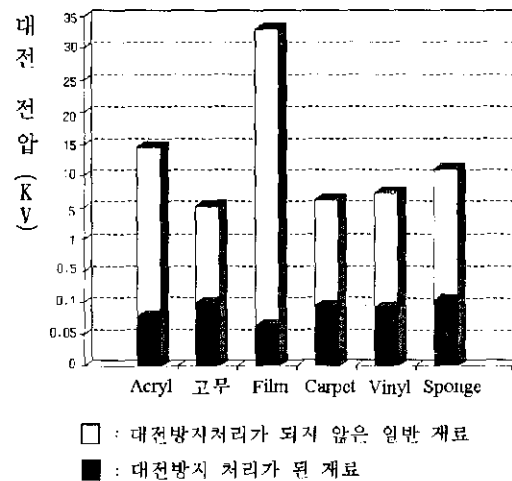


그림 6.8 主要 物質의 帶電防止處理 前後의 帶電電壓 比較

표 6.3에서 알 수 있듯이 帶電防止 處理가 된 物質과 되지 않은 物質을

비교하면 帶電防止 處理의 重要性을 알 수가 있다. 그러나 固體의 表面抵抗이 수십 MΩ 이하에서는 이 表面抵抗과 帶電電壓의 相關關係가 나타나고 있지 않고 있다. 이것이 사실이라면 靜電氣 帶電防止를 위해서 권장되고 있는 表面抵抗이 1 MΩ보다 높아져도 괜찮을 것으로 보이는데, 앞으로 보다 다양하고 精密한 實驗을 실시하여 그 사실을 규명할 필요가 있다.

주요 物質별로 帶電防止처리 前後의 帶電特性을 比較하기 위하여 이를 Graph로 나타내면 그림 6.8과 같다.

(2) 溫度變化에 따른 物質의 帶電特性

環境變化에 따른 物質의 靜電氣 帶電特性을 파악하기 위하여 一定 濕度하에서 溫度를 變化시키면서 實驗을 하고, 이어서 一定 溫度하에서 濕度を 變化시켜 가면서 실험을 실시하였다.

그림 6.9는 고무, Acryl 및 Film에 있어서 帶電防止 處理된 것과 帶電防止 處理가 되지 않은 것을 恒溫恒濕槽를 이용하여 濕度を 40%로 一定하게 유지하면서 溫度를 -20℃, -10℃, 0℃, 10℃, 20℃, 30℃ 및 40℃까지 變化시켜 가면서 靜電氣의 帶電電壓을 測定한 결과를 나타낸 것이다. 여기에서 帶電防止 處理된 물질들은 溫度의 變化에 따라 帶電電壓은 극히 적게 나타났으나, 一般物質인 경우에는 20℃ 이상일 때 높게 나타났다 (표 6.4). 一般物質이 溫度가 10℃가 지나면서 帶電電壓이 높게 나타나는 것은 濕度 Sensor가 恒溫恒濕槽내에 있어 溫度 增加시 物質의 表面에 대하여 濕도가 공간내의 濕度보다 低下될 가능성이 있기 때문에 그에 따른 電氣 導電性的의 低下로 帶電電位가 높아진 것으로 추측된다.

표 6.4 溫度變化에 따른 物質의 靜電氣 帶電電位

(단위: kV)

試料		溫度	-20 ℃	-10 ℃	0 ℃	10 ℃	20 ℃	30 ℃	40 ℃
고무	防止處理		0.025	0.03	0.05	0.08	0.085	0.09	0.09
	一般		1.9	2.05	2.3	8.3	10.9	10.75	11.0
Acryl	防止處理		0.013	0.015	0.025	0.032	0.033	0.05	0.05
	一般		3.0	3.25	2.65	6.25	16.1	20.3	21.0
Film	防止處理		0.02	0.025	0.05	0.08	0.09	0.09	0.09
	一般		0.8	1.1	1.6	2.5	14.25	17.75	18.0

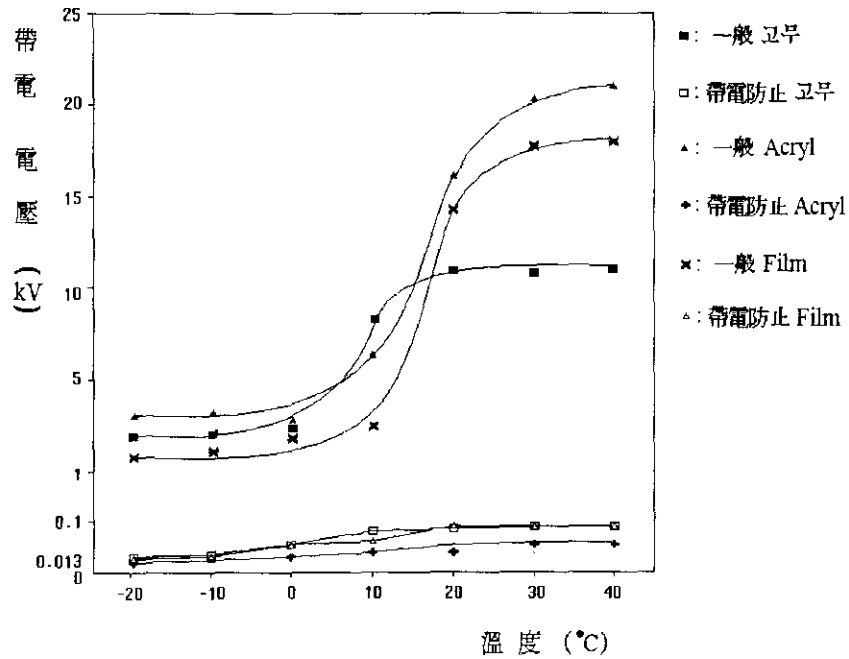


그림 6.9 溫度變化에 따른 物質의 帶電電壓

(3) 濕度變化에 따른 物質의 靜電氣 帶電特性

그림 6.10은 고무, Acryl, Film의 帶電防止 處理된 것과 帶電防止處理가

되지 않은 것에 대하여 恒溫恒濕槽를 이용하여 溫度를 20℃로 一定하게 維持하면서 濕度를 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70% 및 80%까지 變化시켜 가면서 濕度變化에 따른 物質의 靜電氣 帶電 電壓을 나타낸 것이다.

표 6.5 濕度變化에 따른 物質의 靜電氣 帶電電壓
(單位: kV)

試料		濕度	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
고무	防止處理		0.1	0.095	0.085	0.085	0.07	0.075	0.05
	一般		16.65	16.1	10.9	10.85	6.35	5.75	5.65
Acryl	防止處理		0.082	0.06	0.033	0.033	0.018	0.018	0.018
	一般		27.85	27.4	16.1	12.5	8.85	4.30	3.35
Film	防止處理		0.095	0.092	0.09	0.085	0.07	0.075	0.05
	一般		18.25	18.1	14.25	13.7	6.25	4.20	0.25

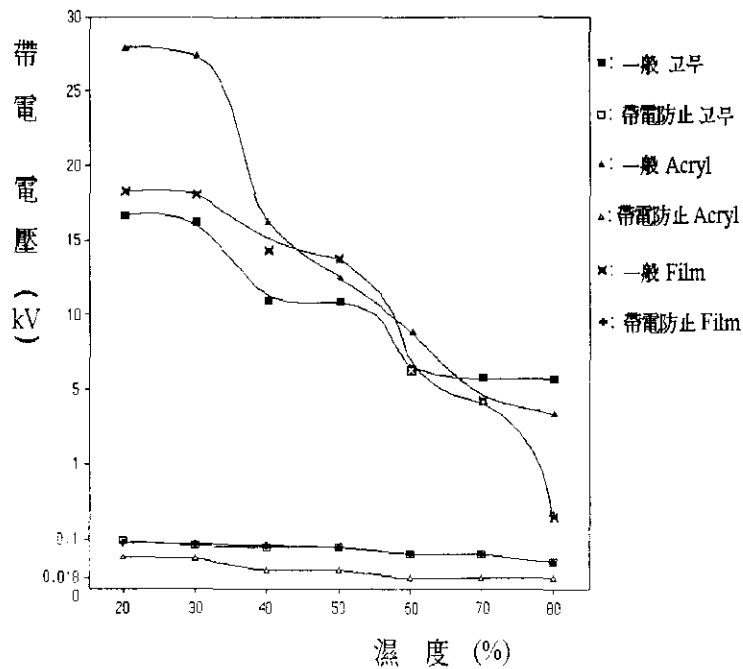
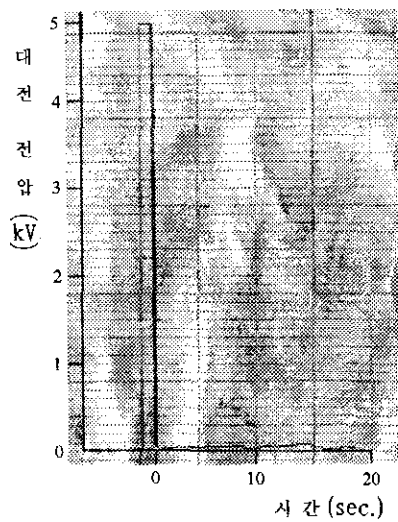


그림 6.10 濕度變化에 따른 物質의 靜電氣 帶電電壓

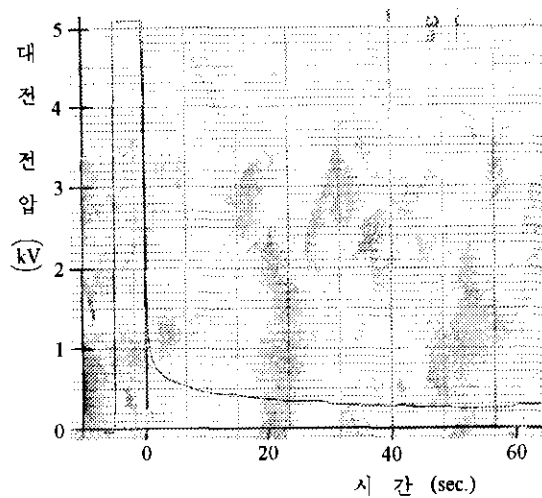
여기에서 帶電防止 處理된 物質들은 濕度の 變化에 따라 靜電氣의 帶電電壓의 變化가 극히 적게 나타났으나, 一般 物質들은 濕度が 낮을수록 靜電氣 帶電電壓이 높게 나타났다 (표 6.5). 따라서, 一般 物質들은 濕도가 높을수록 靜電氣 發生量이 적고 濕도가 낮을수록 靜電氣 發生量이 커지는 것으로 보아 靜電氣 發生은 濕도에 影響을 크게 받는다는 것을 확인할 수가 있었고, 이는 靜電氣 防護對策을 강구하는데 있어 고려하여야 할 매우 중요한 要素중의 하나이다.

6.3.3 物質의 靜電氣 緩和 特性

帶電防止 處理가 된 고무 및 Carpet와 帶電防止 處理가 되지 않은 고무 및 Carpet의 靜電氣 緩和 特性을 조사하기 위하여 Static Decay Meter를 이용하여 溫度 20℃, 相對濕度 60%인 실내 환경에서 物質에 5 kV의 電壓을 인가하여 0%까지 靜電氣가 緩和되는데 소요되는 시간을 측정하였다. 그림 6.11은 帶電防止 處理가 된 고무와 處理가 되지 않은 고무의 靜電氣 緩和 特性을 나타낸 것이며, 그림 6.12는 帶電防止 處理가 된 Carpet와 處理가 되지 않은 Carpet의 靜電氣 緩和特性을 나타낸 것이다. 여기에서 帶電防止 處理가 된 고무와 Carpet는 靜電氣가 0%까지 緩和될 때까지 걸린 시간은 0.01秒로 나타났으나, 處理가 되지 않은 일반고무와 Carpet는 각각 약 60秒 및 150秒가 경과하여도 0%까지 緩和가 되지 않았다. 따라서, 帶電防止 處理가 된 物質은 靜電氣의 緩和도 帶電處理가 되지 않은 一般物質보다 훨씬 더 빠르게 진행된다는 것을 알 수가 있었다.

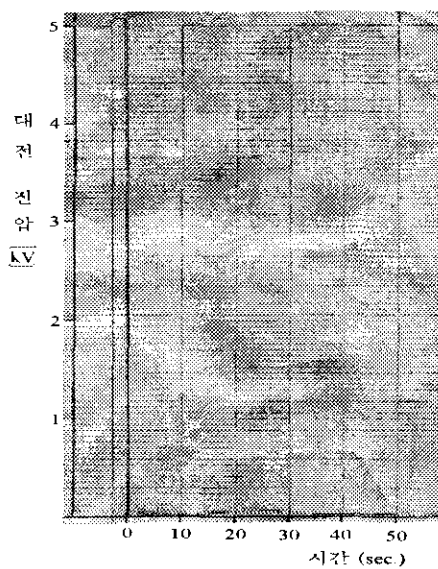


(a) 帶電防止處理된 고무

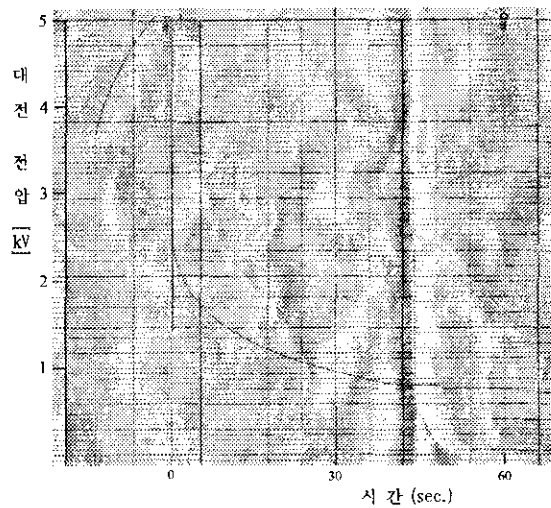


(b) 帶電防止處理가 되지 않은 고무

그림 6.11 고무 材料의 靜電氣 緩和 特性



(a) 帶電防止處理된 Carpet



(b) 帶電防止處理가 되지 않은 Carpet

그림 6.12 Carpet 材料의 靜電氣 緩和 特性

7. 靜電氣로 인한 火災·爆發의 防止對策

7.1 點火 爆發의 防止條件

靜電氣가 原因이 되어 일어나는 火災·爆發에는 앞에서 언급한 바와 같이 다음 두 가지 基本 條件이 있다.

- ① 可燃性物質과 助燃性 Gas가 적절한 성분범위로 섞여져 있는 爆發性 混合氣體가 존재한다.
- ② 靜電氣가 충분히 帶電되어 있는 物體가 있고, 可燃性 物質의 點火源이 되는 靜電氣 放電이 일어난다.

따라서, 火災·爆發은 火藥과 같은 自然性的 爆發性物質을 제외하고는 可燃性物質과 空氣중에 있는 酸素와 같은 助燃性物質이 混合되어 생성된 爆發性 混合氣體가 존재하는 場所에서 帶電物體에서 일어나는 點火能力을 갖는 (즉, 可燃性 混合氣體의 最小點火 Energy 이상의 放電 Energy를 방출하는) 靜電氣放電이 동시에 일어날 때에 발생한다.

이를 뒤집어 말하면, 위의 2 條件중 어느 하나라도 제거하면 點火·爆發은 일어날 수 없으며, 이러한 이유로 靜電氣에 의한 火災·爆發을 防止하는 대책은 이 2 條件이 동시에는 充足되지 않는 方法을 강구하는 것에서부터 시작해야 한다. 그러나 현실적으로는 이를 實現하기가 容易하지 않으며, 때로는 爆發性 混合氣體를 생성하는 可燃性物質 自體가 靜電氣 帶電을 하고 있어 點火性 放電이 발생할 수가 있는 등 대책을 마련하기가 매우 어렵다.

7.2 爆發性 混合氣體의 生成 防止

7.2.1 爆發性 混合氣體

可燃性物質이 空氣나 酸素와 같은 助燃性物質과 적정한 비율로 섞여 있는 狀態에서 點火源이 있으면 燃燒 또는 爆發이 일어나게 된다. 이 燃燒 또는 爆發은 可燃性物質과 助燃性氣體와의 混合濃도가 작아서도 안 되고 많아서도 안 된다. 따라서 燃燒 또는 爆發이 일어나는 混合濃도의 範圍가 可燃性物質의 燃燒 또는 爆發範圍이며, 이 範圍에 있는 混合氣體를 爆發性混合氣體라고 한다. 여기서 爆發範圍에서 上限에 있는 混合氣體의 濃도를 爆發上限界濃度, 下限에 있는 濃도를 爆發下限界濃度라고 하며, 爆發性混合氣體의 生成防止對策을 講究하는데 있어 고려하여야 할 중요한 物理量이다. 또한, 爆發性混合氣體는 이것을 생성하고 있는 可燃性物質에 따라 Gas·蒸氣 爆發性混合氣體와 粉塵 爆發性混合氣體로 分類하여 취급한다.

Gas·蒸氣 爆發性混合氣體는 可燃性Gas 또는 可燃性液體의 蒸氣가 일반적 으로 空氣와 混合되어 생성된다. 예를 들면 水素와 空氣가 섞이면 混合濃도의 體積比가 4.0~75 %일 때 爆發性混合氣體가 생성된다. 可燃性物質이 液體 일 경우는 이 液體로부터 蒸發한 蒸氣가 空氣와 섞여서 爆發性混合氣體가 생성된다. 주요 可燃性物質 (Gas 및 液體의 蒸氣)의 爆發範圍 (燃燒範圍)는 이미 第2章의 표 2.1에 나타낸 바 있다.

Gas 또는 蒸氣와 空氣의 混合氣體의 燃燒範圍는 周邊溫도의 上昇에 따라 더 확장된다. 즉, 周邊溫도가 상승함에 따라 常溫때와 비교하여 燃燒下限界는 더 낮아지고 燃燒上限界는 더 올라간다. 이는 混合氣體의 可燃性이 溫도의 上昇에 따라 增大함을 의미한다.

液體는 蒸氣壓이 溫度에 따라 정해지기 때문에 (그림 7.1), 混合濃度는 이를 고려하여 구해져야 한다. 즉, 大氣壓이 p [mmHg], 어느 溫度에 있어서의 蒸氣壓을 p' [mmHg]이라 하면, 混合濃度 C 는 $C = p'/p$ 에 의하여 구해질 수 있다.

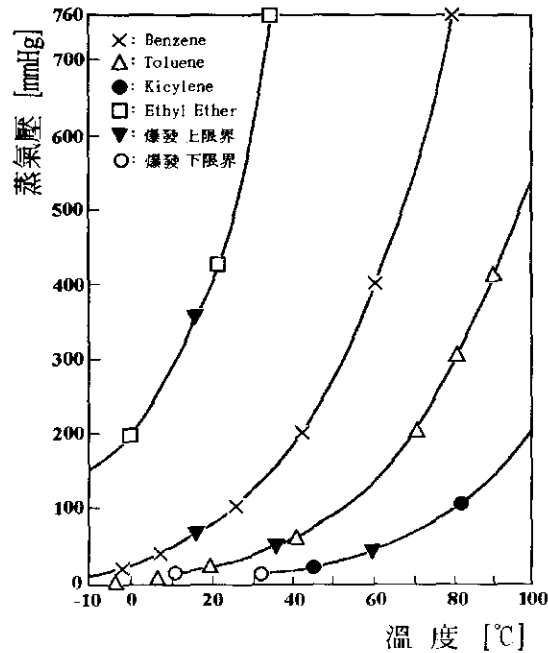


그림 7.1 可燃性液體의 溫度와 蒸氣壓

한편, 粉塵 爆發性混合氣體는 可燃性粉塵이 空氣와 혼합되어 생성되는 것으로서, 보통 空氣중에 可燃性粉塵이 浮遊하는 상태로 되어 있다. 粉塵의 濃度는 空氣 1 m³當 粉塵의 重量 (g)으로 나타내며, 이 濃度가 어떤 數值 (표 7.1 참조) 이상이 될 때 粉塵 爆發性混合氣體가 생성된다. Gas·蒸氣와 달리 爆發上限界 濃度가 없거나 不明確한 것이 많아 흔히 下限界 濃度로만 나타낸다. 또한 粉塵 爆發性混合氣體는 可燃性粉塵이 浮遊하고 있는 경우외에도 이

것이 쌓여 있을 때에도 외부의 작용으로 흩날리게 되어 生成될 수도 있다.

표 7.1 可燃性粉塵의 爆發 下限界濃度

物 質 名	爆發 下限界 濃度 [g/m ³]	物 質 名	爆發 下限界 濃度 [g/m ³]
Acetylcellulose	35	石炭	35
Aluminium	25	Cellulose	45
硫黃	35	Polyurethanform	25
Ethylcellulose	25	Polyethylene	20
Epoxy 樹脂	20	Polyethylene Oxide	30
Cocoa	75	Polycarbonate	25
고무 (天然, 硬質)	25	Polystyrene	15
小麥粉	50	Polypropylene	20
설탕	35	Magnesium	20
감자 澱粉	45		

粉塵 爆發性混合氣體는 그림 7.2에서 보여지는 바와 같이 粉塵의 粒子 크기, 形狀, 比重 등에 의해 영향을 받고, 氣體·蒸氣처럼 空氣중에서 균일하게 분포되어 있지 않으므로 局部的으로 生成될 수도 있다. 따라서 粉塵 爆發性混合氣體는 生成 여부를 판단하기가 극히 어려우며, 존재하고 있는 可燃性粉塵의 量에 의하여 개략적으로 推定할 수 밖에 없다. 그리고 可燃性粉塵이 Gas, 蒸氣와 혼합되어 있는 경우는 이를 Gas·蒸氣 爆發性混合氣體로 취급하는 편이 안전하다.

粉塵 爆發性混合氣體는 Gas·蒸氣 混合氣體와 비교할 때 不確定的인 要素가 많으며 그 범위도 넓은 특성이 있어 生成을 방지하기가 현실적으로 어려운 것들이 대부분이다.

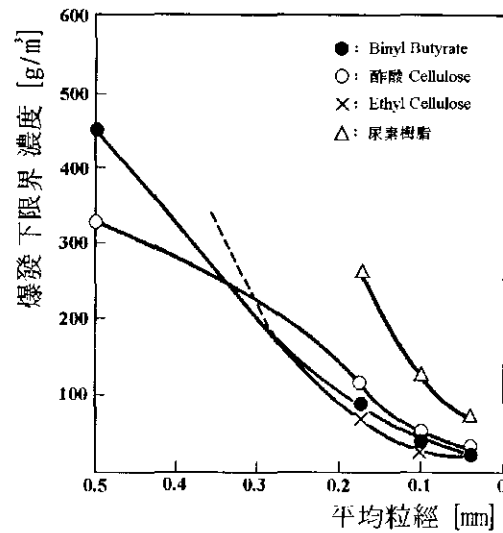


그림 7.2 可燃性粉塵의 平均粒子直徑과 爆發下限界濃度

표 7.2 助燃性Gas에 의한 爆發範圍와 最小點火 Energy의 相違

物質名	空氣中			酸素中		
	最小點火 Energy [mJ]	爆發範圍 [Vol.%]		最小點火 Energy [mJ]	爆發範圍 [Vol.%]	
		下限	上限		下限	上限
Acetylene	0.017	1.5	100	0.0002	2.8	100
Ethane	0.24	3.0	15.5	0.0019	3.0	65
Etylene	0.07	2.7	36	0.0009	3.0	80
Methyl Ether	0.19	1.7	48	0.0012	2.0	82
水素	0.011	4.0	75.6	0.0012	4.0	94
Propane	0.25	2.1	9.5	0.0021	2.3	55
Methane	0.28	5.0	15	0.0027	5.1	61

이상은 助燃性物質이 空氣인 混合氣體에 대해서 검토했으나, 助燃性物質이 空氣가 아닌 酸素의 경우는 그림 7.3 및 7.4에 나타난 바와 같이 爆發性混合氣體의 濃度範圍가 크게 확대된다.

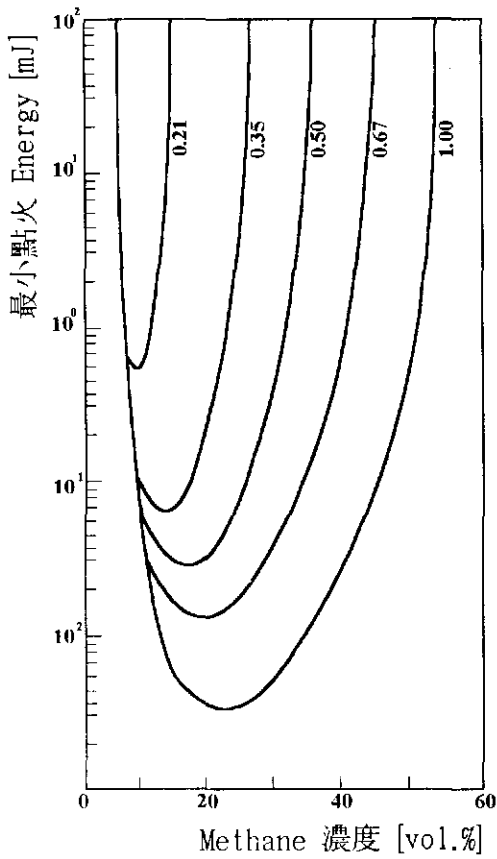


그림 7.3 酸素에 의한 Methane
혼합氣體의 最小 點火
Energy의 變化
(그림 속의 數値는 體積比
 $O_2/O_2 + N_2$ 를 나타냄.)

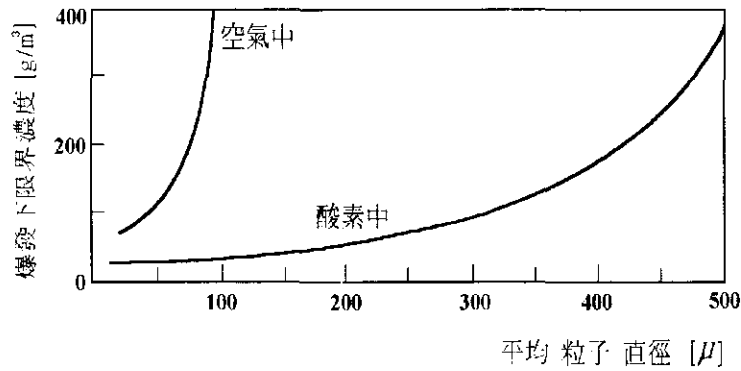


그림 7.4 酸素에 의한 粉塵의 爆發下限界濃度の 變化

또한 이에 따라 생성되는 爆發性混合氣體의 最小點火 Energy도 표 7.2에

나와 있는 것처럼 낮아지게 되어 그 混合氣體는 낮은 點火 Energy에 의해서도 點火 爆發될 危險性이 증대된다. 이것은 可燃性物質이 Gas, 蒸氣 또는 粉體와 같이 單體가 아니고 2種으로 生成된 爆發性混合氣體도 그림 7.5에 例示한 것과 유사한 경우가 있다. 따라서 酸素와 混合되어 있거나 2種의 可燃性物質에 의하여 生成된 混合氣體는 특별히 주의할 필요가 있다.

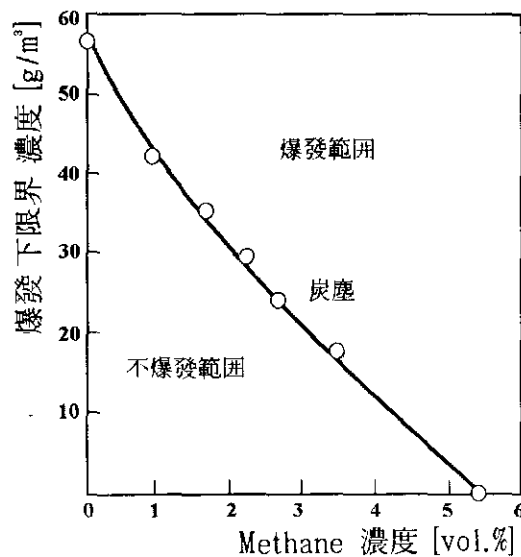


그림 7.5 可燃性 Gas와 粉塵의 혼합에 의한 粉塵의 爆發下限界濃度の 減少

7.2.2 Gas·蒸氣 爆發性混合氣體의 生成防止

Gas·蒸氣 爆發性混合氣體는 生成條件이 비교적 한정되어 있고 理論式에 의해 거의 推算이 가능하다. 즉, 爆發性混合氣體는 可燃性Gas의 量, 可燃性液體 또는 蒸氣의 溫度, 助燃性Gas의 量 등과 같은 物理量의 일정한 범위내에서 生成된다. 따라서, 爆發性混合氣體의 生成을 防止하기 위해서는 우선적으로 표 7.3에 예시되어 있는 것과 같은 可燃性 Gas 및 液體의 比重, 蒸氣密度,

引火點, 發火點 등의 物性を 熟知하는 것이 필요하고, 이를 바탕으로 生成防止對策을 檢討하는 것이 타당한 順序이다.

표 7.3 可燃性 Gas 및 蒸氣의 諸般 特性

物質名	引火點 [°C]	發火點 [°C]	沸騰點 [°C]	比重	蒸氣密度
Acetylene	-	299	-	0.621	0.9
Acetaldehyde	-37.8	185	21	0.783	1.5
Acetone	-19	538	57	0.792	2.0
一酸化炭素	-	609	-192	0.97	-
Ethane	-	575	-88.6	-	1.04
Ethyl Ether	-	180	35	0.71	2.6
Ethylene	-	-	-104	0.99	-
키실렌	32.0	464	144	0.86~0.88	3.7
Ethyl Acetate	-4.4	486	77.2	0.901	3.0
水素	-	571	-252	-	0.07
Toluene	4.4	567	110	0.872	3.1
二硫化炭素	-30	120	46.1	1.263	2.6
n-Hexane	-26	260	68.7	0.664	3.0
n-Pentane	-48	284	36.0	0.631	2.48
Propane	-	504	-42.1	0.508	1.6
Benzene	-11	562	80	0.885	2.8
Methane	-	632	-161	0.55	-
Methyl Alcohol	11	470	64.4	0.793	1.1
n-Heptane	-4.0	247	98.4	0.688	-
硫化水素	-	260	-	1.2	-

爆發性混合氣體의 生成防止對策으로서는 첫째로 可燃性 Gas 및 液體를 취급할 때에는 密封構造의 容器를 사용하고, 가능하면 외부로 누설되더라도 爆發性混合氣體의 濃度範圍에 들지 않을 정도의 量을 취급하도록 한다. 可燃性液體의 경우는 貯藏時에 氣體가 있을 수 있는 빈 空間이 없도록 貯藏容器를 선택하고, 取扱 溫度가 爆發性混合氣體의 生成範圍 밖인 곳에서 취급하여

야 한다. 이와 같은 이유에서 揮發性이 강한 可燃性液體를 開放狀態에서 사용하지 않도록 유의하여야 한다.

2種 이상의 可燃性 Gas 및 蒸氣를 취급하는 경우에는 1種만 있을 때는 爆發 上限界濃度 이상이라도 다른 氣體의 稀釋效果에 의해 爆發性混合氣體가 생성될 수도 있으므로 유의하여야 한다. 예를 들어, Tank Lorry에서 휘발유 (Gasoline)과 燈油 (Paraffin, Kerosene)가 混在해 있는 경우 휘발유의 蒸氣가 燈油의 蒸氣에 의해 희석이 되어 爆發性混合氣體가 생성되기 쉽다.

둘째로 爆發性混合氣體는 可燃性 Gas, 蒸氣 또는 液體가 漏泄, 噴出되어 생성되는 경우가 많으므로 이들이 漏泄되지 容器 및 配管 등을 정기적 및 수시적으로 점검할 필요가 있다. 특히 配管 構造物의 接合部, Valve 등은 腐蝕에 의하여 구멍이 뚫리거나 機能이 저하될 수 있으므로 수시로 점검하고 補修하여야 한다. 漏泄 여부는 赤外線檢出器 등으로, 爆發性混合氣體의 存在는 反應熱式, 光干涉式, 赤外線式 檢知器 등을 사용하여 점검할 수 있다.

生成防止對策의 셋째로는 可燃性 Gas 및 蒸氣가 일정한 공간에 滯留하는 것을 自然換氣나 換氣裝置를 사용하여 防止하는 것을 들 수 있다. 특히 比重이 큰 Gas나 蒸氣는 충분한 通風 換氣가 필요하므로 적절한 換氣設備를 갖추도록 하여야 한다. 예를 들어 실내에서 可燃性液體를 사용하여 塗布 (Painting) 作業을 할 때에 塗布面 근처에 爆發性混合氣體가 생성되기 때문에 이를 즉시 換氣시킬 수 있도록 하여야 한다.

7.2.3 粉塵 爆發性混合氣體의 生成防止

粉塵 爆發性混合氣體는 可燃性粉塵을 취급할 때 필연적으로 生成되는 경우가 많고, 대부분의 경우 이의 生成을 防止하는 것이 매우 어렵다. 따라서

여기서 언급하고자 하는 生成防止對策은 爆發性混合氣體의 生成을 가능한 한 작은 범위에서 짧은 시간에 억제한다는 의미이며, 爆發下限界濃度가 매우 낮은 可燃性粉塵에 대해서는 효과를 기대할 수 없다.

爆發性混合氣體의 生成防止는 可燃性粉塵의 取扱量を 제한하여 混合氣體의 生成 頻度を 最小化하는 것이 중요하다. 또한 爆發性混合氣體의 生成範圍를 작게 한다는 것은 密封構造의 容積을 1 m^3 이하로 적은 容器를 사용하는 것으로서, 取扱량이 많을 때는 이를 分割하는 것이 안전하다. 부득이 한 경우 可燃性粉塵을 開放된 狀態에서 취급할 때에는 이것이 浮遊하거나 飛散해서 廣範圍한 공간에 爆發性混合氣體를 生成하지 않도록 Booth, Tent 등을 사용하여 隔離하여야 한다. 可燃性粉塵을 외부에 漏出시키는 것을 막기 위해서 容器나 取扱場所를 약 10 mmAq 정도를 減壓하는 것이 좋다. 어떠한 경우에도 可燃性粉塵이 외부로 漏出되는 量은 最小限으로 억제하여야 한다.

粉塵 爆發性混合氣體는 浮遊하고 있는 可燃性粉塵 뿐만이 아니고 容器內部面이나 建物內部面に 쌓여있는 粉塵이 흔들림이나 바람 등에 의하여 飛散하는 경우에도 生成된다. 이를 防止하기 위해서는 容器나 建物の 構造를 되도록이면 粉塵이 쌓이지 않도록 設計하여야 한다. 또한 쌓인 粉塵을 清掃하여 제거하는 것도 生成防止의 기본이 되므로 機械裝置나 建物들은 清掃하기가 용이한 構造로 製作 및 建築되어야 할 것이다.

粉塵의 쌓임을 防止하기 위해서는 浮遊하고 있는 粉塵이 가라앉기 전에 換氣시키는 것이 중요하다. 이를 위해서는 粉塵이 발생하여 浮遊하거나 飛散하는 場所에는 반드시 Hood 등의 換氣裝置를 설치하여야 한다.

그밖에 粉塵을 취급하는 裝置는 空氣吸入部分이나 움직이는 部分이 고장나게 되면 여기에 粉塵이 잘 쌓이게 되므로 爆發性混合氣體를 생성할 우려가

있다. 이를 막기 위해서 이들 裝置는 수시로 點檢하고 補修할 需要가 있다.

7.2.4 不活性·不燃性物質에 의한 爆發性混合氣體의 生成防止

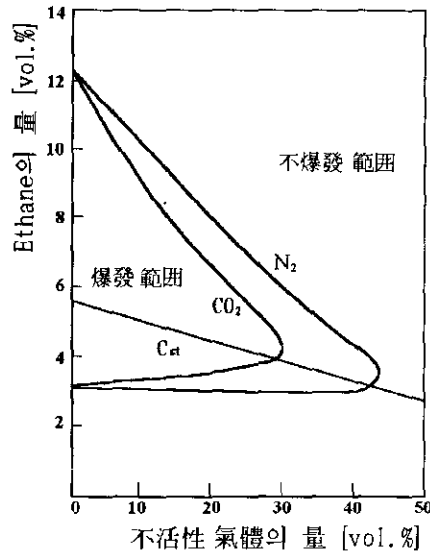


그림 7.6 각종 不活性氣體에 의한 爆發性混合氣體의 生成抑制

Gas·蒸氣 및 粉塵의 爆發性混合氣體는 모두 不活性氣體를 사용하여 爆發性混合氣體의 生成을 방지할 수가 있다. 예를 들면 窒素와 같은 不活性氣體에 의하여 空氣를 置換하면 助燃性物質이 없기 때문에 可燃性物質의 量이 많더라도 爆發性混合氣體가 生成되지 않는다. 또한 不活性氣體를 사용하면 그림 7.6에 나타나 있는 바와 같이 助燃性氣體를 완전히 置換하지 않더라도 可燃性物質의 爆發性混合氣體 範圍가 좁아진다. 더욱이 이 때 點火爆發을 일으키는데 필요한 點火 Energy가 커지게 된다. 따라서 不活性氣體의 添加는 爆發性混合氣體의 生成을 防止하는데 있어 매우 유용한 대책이 될 수 있다. 이러한 不活性氣體로는 窒素외에도 二酸化炭素, Argon, Helium 등이 많이 사용

되고 있다.

여기서 주의할 사항은 窒素와 二酸化炭素와 같은 不活性氣體는 作業者が 吸入하면 人體에 傷害를 일으킬 수가 있다는 점이다. 예를 들어 窒素에 의해 酸素濃度가 저하된 空氣를 吸入하면 酸素缺乏에 의해 어지러움, 嘔吐, 運動機能障害 등이 發生되기도 하고 심할 경우 사망에 이르는 경우도 있다. 그리고 二酸化炭素를 흡입하면 麻酔症勢가 나타나며 그 量이 많을 때에는 窒息死를 유발한다. 따라서 不活性氣體를 사용하는 경우에는 이 點에 특별히 유의하여야 한다.

不燃性物質을 사용하여 爆發性混合氣體의 生成을 방지하는 방법도 있다. 물론 이 方法은 不活性氣體와 같이 完全한 生成防止對策으로는 볼 수 없고, 단지 點火爆發의 發生을 抑制시키는 役割을 기대할 수 있다. 즉 可燃性物質에 물이나 岩粉 등의 不燃性物質을 混入시키면 點火 Energy가 커져서 點火爆發이 抑制된다 (그림 7.7 참조). 이것은 粉塵뿐만 아니라 Gas·蒸氣에 대해서도 有效하다. 水分의 添加는 氣體狀態 空間의 濕度を 높여 點火爆發을 抑制시킬 뿐만 아니라 잘 알려진 대로 靜電氣의 帶電防止에도 효과가 있다.

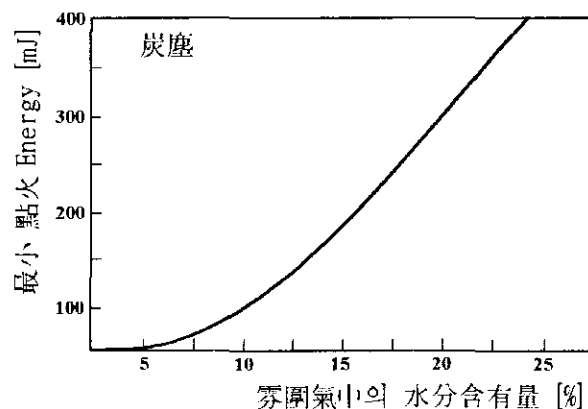


그림 7.7 空間의 水分含有量에 따른 炭塵의 最小點火 Energy의 增加

7.3 點火性 放電의 發生 防止

爆發性 混合氣體를 點火시키는데 필요한 點火 Energy는 그 混合氣體를 구성하고 있는 可燃性物質의 種類와 組成, 주변 環境의 溫度和 壓力 등에 따라 變化하기 때문에 點火性放電의 크기는 일률적으로 정할 수가 없다. 다만 편의상 여기서는 點火性放電을 最小點火 Energy가 0.02 mJ 정도가 되는 可燃性物質을 點火시킬 수 있는 靜電氣放電으로 간주한다. 이 수치는 大氣壓에서 水素-空氣系의 爆發性 混合氣體를 點火시키는데 충분한 量의 Energy를 放出하는 靜電氣放電을 가리키는 것이 된다. 표 7.2에 나와 있는 바와 같이, 대부분의 可燃性物質-空氣系의 爆發性 混合氣體의 最小點火 Energy가 이보다 커서 넓은 범위에 걸쳐 의미를 갖기 때문이다.

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.

火災·爆發을 防止하기 위해서는 點火性 Energy를 갖는 靜電氣 放電을 막으면 되나 그 이전 단계부터 대책을 강구하는 것이 현실적이고 효율적이다. 즉, 폭발 위험지역에서 靜電氣가 생성되는 것을 遮斷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 이행할 필요가 있다.

- ① 모든 導電性 部品の 靜電氣 接地: 물체 어느 점에서든 放電抵抗이 10^6 Ω 이하로 接地되면 靜電氣接地로 간주함.

- ② 움직이는 物體의 電氣抵抗을 작게 함.
- ③ 靜電氣放電이 일어날 수 있는 제품에는 接地된 金屬片을 삽입함.
- ④ 相對 空氣濕度の 增加: 相對空氣濕度を 약 65% 정도 올리면 대부분의 不導體의 表面抵抗이 충분히 감소됨. 그러나, Plastic 材料는 疏水性 (Hydrophobic)이기 때문에 이 방법은 소용이 없음.
- ⑤ 空氣의 Ion化.

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된 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 그림 7.8에서 보여지는 것과 같이 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.

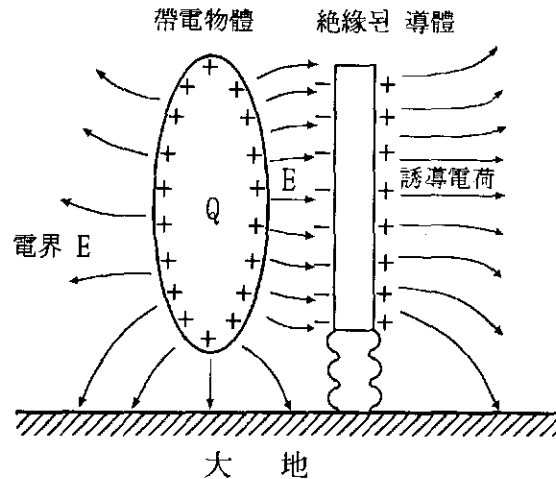


그림 7.8 浮遊導體가 받는 靜電誘導

點火性放電에 의한 災害를 막기 위해서는 爆發性霧圍氣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 지난해의 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 방법중의 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 공간중으로 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 薄離帶電 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 발생하는 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 사용하든가 周邊을 어둡게 한 후 肉眼으로 觀察하는 것이 좋다.

그림 7.9에 나와 있는 바와 같이 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.

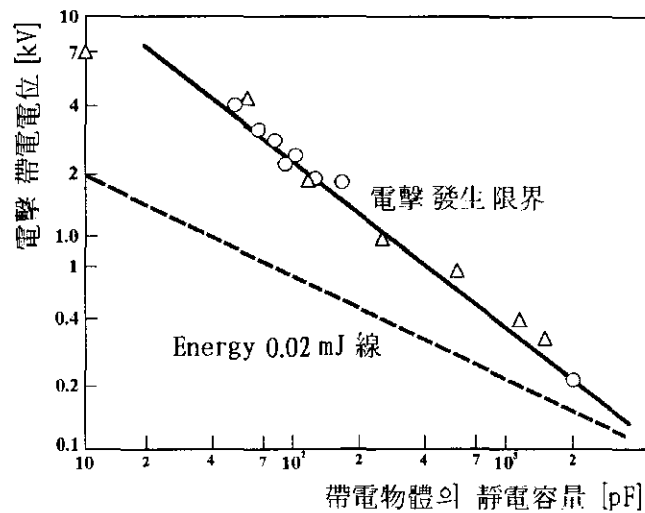


그림 7.9 導體의 帶電에 의하여 電擊을 받는 電位와 導體의 Energy

(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.

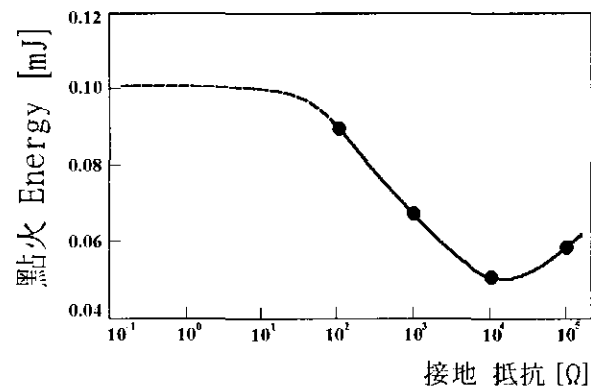


그림 7.10 接地抵抗과 點火 Energy와의 關係

다음으로 近接物體는 接地되어 있거나 되어 있지 않은 경우이나 마찬가지로

로 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 點火性放電을 방지할 목적으로 近接導體의 表面을 絶緣體로 씌운다든지 近接物體를 抵抗接地하는 시도가 있는데, 이 경우 확실히 放電의 發生頻도가 감소하여 點火確率이 작아질 수가 있다.

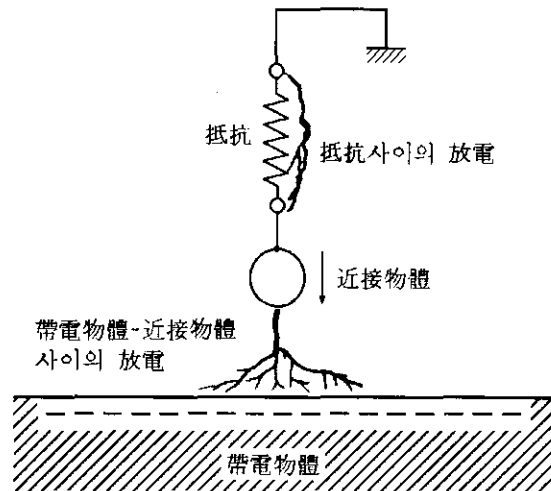


그림 7.11 抵抗을 經由하지 않는 放電

그러나 이것은 接續한 抵抗에 放電에너지가 소비된 경우로서 때에 따라서는 그림 7.10에 나타난 것과 같이 저항을 접속함으로써 點火에너지가 작아졌다는 연구결과도 나오고 있다. 그러나 靜電氣와 같은 容量性放電은 반드시 抵抗을 통해서 放電한다고는 볼 수 없고, 그림 7.11에 나타내져 있는 모델과 같이 帶電物體와 近接物體 및 抵抗의 兩端에서도 放電이 발생할 수가 있다. 이렇게 되면 點火性放電의 防止에는 큰 效果가 없기 때문에 接地回路 전체에 걸쳐서 抵抗이 고루 分布되도록 조치하지 않으면 안된다. 또한, 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한다. 따라서 近接物體를 抵抗接地하면 點火性放電의 防止가 완전히 해결된다고 할 수는 없으므로 帶電防止가 최우선적으로 필요하다. 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 하나로써 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. 그림 7.12에서 보여주는 것은 點火性放電을 防止하기 위하여 液體採取容器의 下端에 針을 附着한 例로서 이 針은 採取容器가 液面을 향해 내려올 때 그림과 같이 된다.

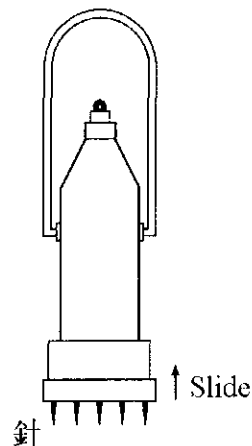


그림 7.12 液體採取器 下端에 設置한 針

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 發生頻度가 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 接地速度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 어렵다. 이것은 經驗的으로 判明되어 있는 것으로서, 앞으로 理論的으로 좀더 상세히 糾明되어져야 할 사항이다.

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되어져야 한다. 이의 대한 方法으로는 [1] 등 既 研究되어 發表되어 있는 文獻資料들을 參考할 것을 勸告한다.

8. 맺 음 말

靜電氣의 發生 및 放電 등에 대한 特性과 靜電氣의 帶電防止 및 除電 등을 포함한 일반적인 靜電氣 防護對策에 관하여는 지난해에 개략적인 研究를 수행한 바 있다. 금년에는 範圍를 局限하여 靜電氣 放電에 의한 産業現場의 火災·爆發 災害 防止를 위한 보다 구체적인 指針을 마련하고자 靜電氣에 의한 爆發性 混合氣體의 點火 爆發 Mechanism을 調査 分析하였으며, 靜電氣와 관련된 여러 가지 實驗을 實施하는 研究를 遂行하였다.

먼저 본 研究에서 다룬 內容들을 간략히 要約하면 다음과 같다. 第2章에서는 點火 爆發의 여러 가지 要因에 대하여 分析하였고, 第3章에서는 點火 爆發의 Mechanism을 고찰하였다. 第4章에서는 靜電氣 放電과 點火에 대한 관계를 살펴 보았고, 第5章에서는 火災·爆發과 관련한 靜電氣 帶電에 관하여 分析하였다. 第6章에서는 靜電氣와 관련된 物質들의 여러 가지 特性을 파악하기 위한 實驗을 실시하였다. 즉, 固體物質의 表面抵抗을 측정하고, 溫度 및 濕度 등 環境變化에 따른 物質의 帶電特性을 實驗을 통하여 考察하였다. 아울러 物質의 靜電氣 緩和特性을 實驗을 통하여 살펴 보았다. 6章에서는 또한 靜電氣 放電 Energy에 의한 混合氣體의 爆發特性을 糾明하기 위하여 爆發實驗裝置를 設計하여 製作 設置하였다. 마지막으로, 第7章에서는 靜電氣에 의한 火災·爆發의 防止를 위하여 綜合的인 對策을 提示하였다.

作業場 특히 密閉되어 있는 作業場에서는 火災·爆發이 일어날 수 있는 주요한 要因을 除去하는 方策이 講究되어져야 한다. 무엇보다도 먼저 이러한 作業場이 可燃性 또는 爆發性 混合氣體가 存在하는 爆發性 霧圍氣가 되는 것을 防止해야 할 것이다. 그 다음으로 고려하여야 할 사항이 이 霧圍氣에서는

點火源이 될 수 있는 어떤 것도 存在하지 않도록 遮斷하는 일이다. 靜電氣가 바로 이 點火源중의 하나가 될 수 있으므로, 可燃性 混合氣體가 存在하는 爆發性霧圍氣에서는 靜電氣 放電에 의한 點火 爆發을 防止하기 위한 手段이 講究되는 것이 必須的이다.

點火能力이 있는 靜電氣 放電을 防止하기 위한 方法에는 수많은 것들이 있다. 根本的으로는 靜電氣의 發生 自體를 防止하는 것이 바람직하나 이는 현실적으로 不可能하거나 매우 어렵다. 實驗을 통하여 확인되었듯이 비교적 손 쉬운 方法중의 하나가 이 地域에서 사용되는 物質들은 반드시 帶電防止 處理를 하여 사용하는 일이다. 그리고 周邊環境의 相對濕度를 適正值 (보통 60 %) 이상으로 維持시켜 靜電氣의 蓄積을 막아 物體가 높은 電壓으로 帶電되는 것을 방지할 수 있다. 물론 工程에 따라서 이 보다 높은 濕度를 維持시키는 것이 바람직한 것도 있고, 어떤 工程에서는 높은 濕度가 製品의 品質惡化를 초래하는 등 工程상의 다른 이유로 곤란한 경우도 있으므로 유의할 필요가 있다.

靜電氣에 대한 研究 對象과 範圍는 매우 넓어 앞으로도 계속하여 본격적인 研究를 遂行하여야 한다. 가까운 장래에는 금년에 設計하여 製作 設置한 爆發 實驗裝置를 더욱 補完하여 우리 産業體에서 사용하고 있는 여러 가지 爆發性 混合氣體의 點火·爆發 特性을 糾明하기 위한 研究를 着手할 필요가 있다.

지난 12월 7일에 일어났던 아현동 都市가스 供給基地에서의 Gas 爆發 慘事 등 최근 事業場의 火災·爆發 事故와 住宅街의 都市Gas 爆發事故 등이 頻發하고 있는데, 여기에는 여러 가지 原因들이 있겠지만 무엇보다도 관련 從事者들의 安全知識 및 安全意識의 缺如와 이에 따른 安全守則의 未遵守가 가

장 큰 문제라고 생각된다. 靜電氣도 火災·爆發 事故를 일으킬 수 있는 한 要因으로 작용된다는 점에서 이 또한 관련 從事者들에게 周知시키고 싶다. 미흡하나마 이 研究報告書에서 다룬 여러 가지 事項들이 産業現場 등에서 靜電氣로 인한 火災·爆發 災害를 豫防하는데 널리 活用되기를 간절히 期待해 마지 않는다.

끝으로 본 報告書에서 잘못되거나 未盡한 事項이 發見되거나 이 分野 研究主題에 대한 좋은 意見이 있을 경우 주저없이 著者에게 알려주시면 向後 研究를 보다 알차게 遂行해 나가는데 큰 도움이 될 수 있을 것이다.

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
연구보고서 기전연 93-8-14, 1993. 12.
- [2] National Fire Protection Association, NFPA 77: Recommended
Practice on Static Electricity, 1988.
- [3] National Fire Protection Association, NFPA 53M: Manual on Fire
Hazards in Oxygen-Enriched Atmospheres, 1990.
- [4] British Standards Institution, BS 5958: Code of Practice for Control of
Undesirable Static Electricity, Part 1, 1980.
- [5] British Standards Institution, BS 5958: Code of Practice for Control of
Undesirable Static Electricity, Part 2, 1983.
- [6] Handbook of Electrostatics, 日本 靜電氣學會 編, オ-ム社, 1981.
- [7] G.T. Dangelmayr, ESD Program Management, Van Nostrand
Reinhold, New York, U.S.A., 1990.
- [8] B.C. O'Neill (Ed.), Electrostatics 1991, Proc. 8th International
Conference on Electrostatics, Institute of Physics, Bristol, England,
1991.
- [9] G. Baumgartner, "Electrostatic Measurement for Process Control",

EOS/ESD Symposium Proceedings, pp. 25-33, 1984.

[10] M. Honda and Y. Ogura, "Electrostatic Spark Discharges - Three Factors Are Critical, EOS/ESD Symposium Proceedings, pp. 149-154, 1984.

[11] R. King and J. Magid, Industrial Hazard and Safety Handbook, Butterworths, London, U.K., pp. 532-542, 1984.

靜電氣에 의한 火災·爆發 災害의 豫防
(기전연 94-6-8)

發行日：1994. 12. 31

發行人：院 長 徐 相 學

著 者：機械電氣研究室長 李 寬 珩

發行處：韓國産業安全公團

産業安全研究院

住 所：인천직활시 북구 구산동 34-4

電 話：(032) 513-0230

F A X：(032) 518-6483

<非賣品>