

靜電氣 放電과 三成分系 可燃性 混合氣體의 最小點火 Energy 測定에 관한 研究

李寬珢*, 崔相源*, 鄭載喜**, 李德出***

* 韓國産業安全公團 産業安全研究院, ** 서울産業大學校, *** 仁荷大學校

Electrostatic Discharge and the Minimum Ignition Energy Measurement of Three-Component Flammable Gas Mixtures

Gwan-Hyung Lee*, Sang-Won Choi*, Jae-Hee Chung**, Duck-Chool Lee***

* Korea Industrial Safety Corporation, ** Seoul Technical University, *** Inha University

Abstract - When flammable gases are mixed with air or oxygen in the explosion concentration range and are ignited by sufficiently large electrostatic discharge energy, they may explode causing severe disaster in workplaces. The minimum ignition energy (MIE) of single gas-air mixtures has been already investigated by many researchers, but the MIE of mixtures of more than three substances is not examined yet. The purpose of this study is to investigate the MIE of several three-component gas mixtures experimentally. The result of our experiment shows that the MIE of some gas mixtures is quite different from that we expected based on the characteristics of individual gas-air mixture.

의 에너지가 가해지면 점화가 되어 폭발을 일으키게 된다. 여기서 점화를 일으키는데 필요한 최소한의 에너지를 最小點火에너지 (Minimum Ignition Energy; MIE)라고 한다. 靜電氣 등에 의한 高電壓의 전기가 放電될 때는 熱에너지로 방출하게 되는데 이 熱에너지도 점화에너지로 작용하게 된다.

放電은 기체의 絶緣이 파괴되어 나타나는 현상으로서 방전경로의 형성은 전극의 구조, 전압의 인가 방법, 기체의 압력 및 온도 등에 따라 차이가 나고, 방전의 형태에 따라 발생하는 열량도 상이하다. 그러므로 방전에 의한 점화에너지를 구할 때에는 여러 가지 실험 조건들을 고려하여야 한다.

정전기가 방전될 때에는 다음과 같은 식으로 주어지는 방전에너지를 방출한다.

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

여기서, E 는 방전에너지 (단위: J), C 는 정전용량 (단위: F), V 는 대전전압 (단위: V), 그리고 Q 는 대전된 정전기량 (단위: C)이다.

정전기가 갖고 있는 에너지는 방전 시에 여러 가지 형태를 통하여 외부로 방출된다. 이중 가장 방출에너지가 큰 방전의 형태가 불꽃방전 (Spark Discharge)으로서 매우 빨리 진행되며 고밀도의 전류와 섬광을 동반하고 주변 기체를 이온화시킨다. 정전기 방전에 따른 점화능력을 평가하기 위해서는 이 방전에너지와 가연성물질의 MIE를 비교하는 것이 필수적이다. 그러나 방전경로에 저항이 있으면 저장된 에너지의 일부가 이 저항에서 소비되고 Spark 시간도 길어지게 되어 이들의 단순 비교는 유효하지 않을 경우도 있다.

1. 서론

石油化學工場을 비롯한 産業現場에서 빈번히 발생하고 있는 火災·爆發 災害는 可燃性物質, 支燃性物質 및 點火源으로 일컬어지는 三要素를 적절히 管理하지 못하는데서 비롯되는 경우가 대부분이다. 支燃性物質인 空氣는 어디에나 存在하므로 이를 관리하기는 현실적으로 불가능하다고 볼 수 있으나 可燃性物質과 點火源은 우리가 적절히 對處한다면 얼마든지 防護할 수가 있다.

可燃性物質은 單一 成分으로 존재하는 경우도 있겠으나 두 가지 이상이 함께 混在하는 混合物質의 형태로 있는 경우가 많다. 그 동안 單一 成分의 可燃性가스에 대한 點火 Energy 및 點火 메커니즘에 관한 연구는 많이 진행되어 왔다. 그러나 두 가지 이상의 成分이 혼합된 可燃性 混合氣體의 點火 Energy 등에 관한 연구는 아직까지 이루어지지 않고 있다. 이 논문에서는 靜電氣의 放電 Energy가 點火源으로 작용하여 可燃性 混合氣體의 火災·爆發을 예방하기 위하여 三成分系 混合氣體의 最小點火 Energy 등을 규명하기 위한 측정방법 등에 대해서 고찰하고자 한다.

可燃性 Gas가 공기 또는 산소와 혼합되어 그 혼합조성이 폭발농도 범위내에 있을 때 일정량 이상

2. 최소점화에너지

2.1 MIE에 미치는 영향

용량성 불꽃방전은 유도성 불꽃방전과 비교하여 전류값이 크고, 방전 지속시간이 훨씬 짧은 특징을 갖고 있기 때문에 정전기 방전과 같은 양상을 나타낸다. 이 때문에 용량성 불꽃방전에 의하여 구해진 점화에너지는 그대로 정전기 방전에 의한 에너지로

적용하는 것이 가능하다.

정전기 방전이 가연성 혼합기체를 점화시킬 수 있는지의 여부는 가연성 혼합기체의 성분 및 온도, 방전에너지 및 분포 등 여러 조건에 의존한다. 현장에서 가장 흔한 점화원은 절연물로부터 생겨나는 전기 스파크이며, 따라서 이 스파크가 점화에너지를 측정하는데 있어 가장 널리 쓰여지고 있는 수단이다. 어떤 가연성 혼합기체에 대한 점화에너지는 공기중 농도에 따라 변한다. 따라서 대부분의 가연성 혼합기체의 MIE는 특정한 혼합농도에서 나타난다. 에탄(Ethane), 부탄(Butane)과 같은 포화탄화수소 가스나 증기의 MIE는 0.25mJ이며, 에틸렌(Ethylene), 아세틸렌(Acetylene)과 같은 불포화탄화수소 가스는 이보다 훨씬 낮은 에너지에서도 점화가 가능하다.

그러나 두가지 이상의 가연성 물질이 섞여 있는 혼합기체의 경우, 각 물질의 농도가 폭발하한계 이하일지라도 폭발성을 가질 수 있다. 예를 들어 분진에 가스가 혼합되면, 혼합된 가스의 함량이 폭발하한계보다 크게 낮더라도 폭발이 일어날 위험성이 있다. 또한 공기중의 산소 농도가 증가할수록 점화에너지는 감소하여 폭발위험성이 높아지게 된다.

2.1.1 온도 및 압력에 의한 영향

일반적으로 MIE는 온도의 상승에 따라 현저하게 감소한다. 점화에너지의 온도변화를 나타낸 수치는 대체적으로 다음 식을 따른다.

$$E_{ig} = Ce^{kT_0} \quad (2)$$

여기서 E_{ig} : 점화에너지, T_0 : 가연성 혼합기체의 초기온도, C 및 k : 가연성 물질에 따른 定數.

MIE의 압력 의존성은 다음과 같은 식으로 나타내어진다.

$$E_{ig} \cdot P^b = \text{일정} \quad (3)$$

여기서 P 는 압력이고, 대부분의 경우 $b \cong 2$ 이며, Propane-공기 혼합기체의 경우는 $b \cong 1.5$ 이다.

2.1.2 조성 및 첨가물에 의한 영향

MIE는 가연성 혼합기체의 농도에 따라서 현저하게 변화하여 化學量論比(Stoichiometric Ratio) 근처에서 최소치를 갖고, 저농도측과 고농도측에서 무한대가 된다.

가연성 기체에 산소를 혼합하면 공기만 혼합되어 있을 때 보다 MIE가 현저히 감소한다. 반면에 가연성 기체에 불활성기체를 첨가하면 폭발범위가 좁아질 뿐만 아니라, MIE도 높아지게 된다.

2.1.3 消焰距離

消焰距離는 폭발성 혼합기체로 채워진 용기를 좁은 통로로 연결된 두 부분으로 격리할 경우, 한쪽에 있는 혼합기체가 점화된 후 화염이 이 통로를 전파하여 가서 다른 쪽에 있는 혼합기체를 점화시

킬 수 있는 최대의 통로 길이를 말한다. 통로가 이 길이보다 길 경우 화염은 전파되지 못하여 다른 쪽의 혼합기체를 점화시키지 못하게 된다.

MIE는 에너지 공급원의 기하학적 형상 및 공급속도와 방법에 따라 크게 영향을 받고, 소염거리는 좁은 통로부분의 기하학적 형상에 크게 의존하며, 이 양자간에는 밀접한 관계가 있다.

MIE E_{min} 와 소염거리 d 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

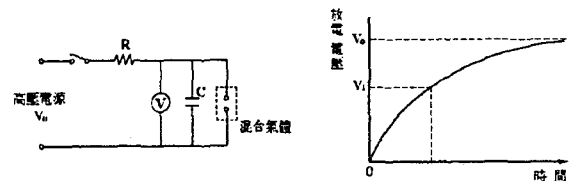
$$E_{min} \propto d^2 \quad (4)$$

2.1.4 기타 인자에 의한 영향

MIE의 大小는 가연성물질의 화학구조에 따라서도 다르다. 탄화수소의 점화에너지의 경우 Alkane > Alkene > Alkyne의 순으로 감소한다.

가연성 혼합기체가 유동하고 있을 경우에는 유동속도가 클수록 MIE가 커지게 되는데 이는 유동할 때 열손실이 발생하기 때문이다.

2.2 MIE의 측정방법



(a) 불꽃 放電 回路

(b) 불꽃電壓間 電壓의 時間變化.

그림 1 점화에너지 측정회로의 개략도

MIE는 전기의 불꽃방전 에너지를 이용하는 방법이 정밀도가 높고 재현성이 좋아 일반적으로 많이 사용되고 있다. 그림 1은 불꽃방전을 이용한 MIE 측정법의 원리를 보여주고 있다. 정전용량 C 인 콘덴서에 서서히 충전하고, 그 양단의 전압이 불꽃방전 전극의 절연파괴전압 V_1 에 달하면 방전이 일어나게 된다. 방전후의 전압은 V_2 가 되는데, 이 때의 방전에너지 E 는 다음과 같이 주어진다.

$$E = \frac{1}{2} C (V_1^2 - V_2^2) \quad (5)$$

점화의 유무에 의하여 최소점화에너지 E_{min} 이 결정된다. 이때 측정되는 점화에너지는 전극의 형상 및 전극 간격에 의하여 영향을 받으므로 이들 인자들을 변수로 하여 측정하여야 한다.

3. 실험장치의 구성 및 실험방법

3.1 실험장치 구성

이 연구에서 MIE 측정을 위해 설계하여 제작·설치한 실험장치는 高電壓 直流電源 供給器, 콘덴서 Box, 가스 저장통 및 혼합기, 그리고 放電電極과 폭발통 등으로 구성되어 있다. 이 중에서 전기시스템만을 나타내면 그림 2와 같다. 이 전기 시스템은 30kV 高壓을 취급하므로 배선 등에서 많은 주의를

기울어야 한다. 콘덴서와 접속되는 모든 접속부는 Sealing 또는 Coating 처리하여 고전압의 누설이 없도록 하였으며, 시스템 전체는 접지를 하여 전원 계통과 등전위를 갖도록 하였다. 또한 10~30 pF의 저용량 Condenser의 경우는 Stray Capacitance 및 Inductance에 문제가 있으므로 배선은 가능한 한 짧게 하였다.

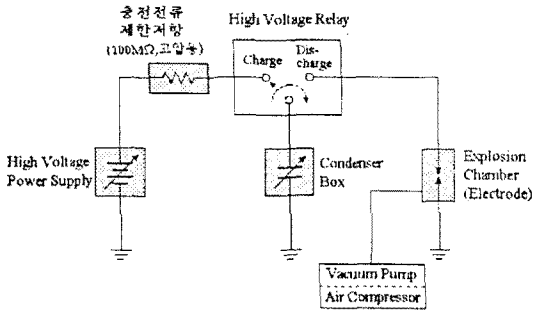


그림 2 점화에너지 측정장치의 전기 시스템 구성도

3.2 실험방법

본 실험에서는 먼저 Ethylene (C₂H₄), Methane (CH₄) 및 Propane (C₃H₈) 가스가 공기와 혼합된 二成分系 可燃性氣體에 대한 點火Energy 測定實驗을 실시한 후 이 Gas들을 두 가지씩 vol.% 비가 1:3, 2:2 및 3:1이 되도록 섞어 空氣와 混合된 三成分系 可燃性 混合氣體의 點火Energy를 측정하였다.

실험에 의하여 MIE를 산출할 때 특히 주의를 요하는 사항은 사용하는 콘덴서의 용량과 배선 Line의 Stray Capacitance를 정확하게 측정하는 일이다. 그림 3은 측정회로 각 부분별로 Capacitance를 나타내고 있다.

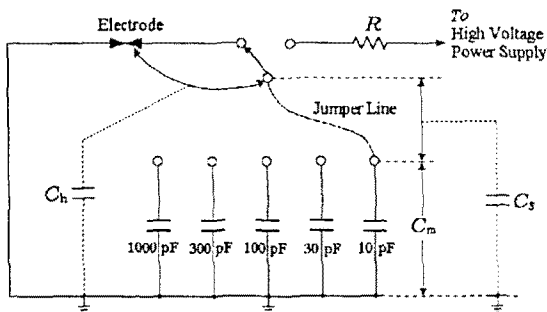


그림 3 測定 回路에 나타나는 Capacitance

방전전극에서 발생하는 방전전압은 정전용량의 C₁ 및 C₂에 의해 나누어 인가되므로 에너지 산출식은 아래 식에 의하여 구하였다.

$$E = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} (C_1 + C_2)(V_1 - V_2)^2 = \frac{1}{2} \frac{C_1^2}{C_1 + C_2} V_1^2 \quad (6)$$

여기서, E = 방전에너지 [J]; C = Capacitance [F]; V = 인가전압 [kV]; C₁ = 충전회로 Capacitance [F]; C₂ = 방전회로 Capacitance [F]; V₁ = 공급전압 [kV] 그리고 V₂ = 방전후의 전압 [kV].

위 계산식에 의해 구한 전극의 전압은 오실로스코프로 방전파형을 관측하여 그 전압 등을 확인하였다.

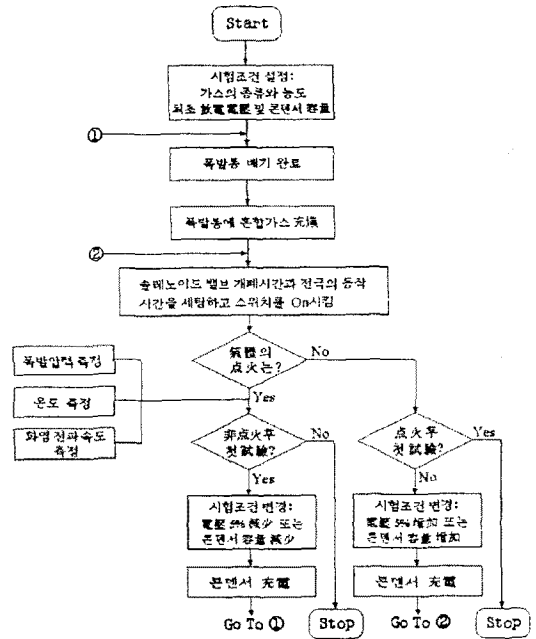


그림 4 可燃性混合氣體의 點火Energy 測定實驗 順序圖

가연성가스의 MIE측정의 실험은 그림 4와 같은 방법으로 실시하였다.

3.3 측정지점의 결정방법

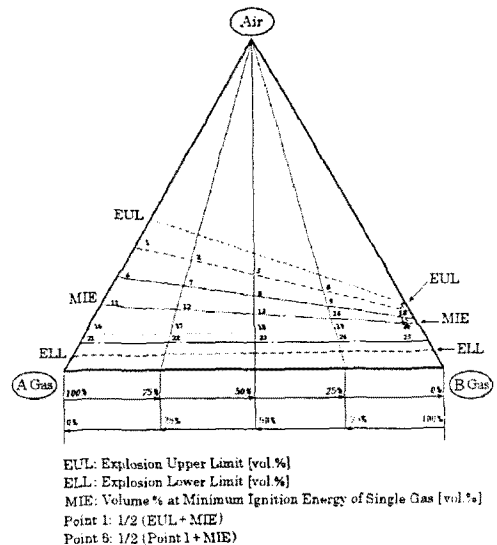


그림 5 測定點 (Measuring Points)의 選定

실험을 위한 측정지점의 결정방법은 실험 목적상 여러 가지 방법이 있었으나 여기서는 다음과 같은 방법으로 결정하였다. (그림 5 참조)

① 정상각형을 그려 삼각형 밑변의 양 꼭지점에 실험하

고자 하는 2種의 可燃性 Gas를 나머지 꼭지점에 공기를 정한다.

- ② 공기를 중심으로 하여 마주보는 변을 四等分한다.
- ③ 실험하고자 하는 可燃性 Gas의 爆發特性을 찾아낸다.
- ④ 두 Gas의 爆發上限界 (Explosion Upper Limit: EUL)와 爆發下限界 (Explosion Lower Limit: ELL) 및 단일 Gas에서의 MIE를 측정 한 vol.%를 찾아낸다.
- ⑤ 위 ④의 爆發 특성을 단일 Gas와 공기와의 정상각형의 변의 全體 距離를 100 % 하여 거리에 따른 vol.%로 EUL, ELL 및 MIE 點을 그린다.
- ⑥ 두 Gas 사이의 點을 서로 연결한다.
- ⑦ 두 Gas의 MIE 線과 EUL, ELL 線사이를 이등분한다.
- ⑧ 위 ⑥의 二等分線과 MIE 線사이를 다시 이등분한다.
- ⑨ 전체 七等分된 선 중에서 EUL 및 ELL의 두 線을 제외한 五等分 線과 위 ②에서 공기를 중심으로 하여 두 混合 Gas 사이를 四等分한 線의 交叉點을 實驗의 測定點으로 결정한다.
- ⑩ 각 交叉點을 위에서 아래로, 좌에서 우로 일련번호를 기입한다. (#1 ~ #25)

4. 실험결과 및 분석

Ethylene-Methane-공기, Ethylene-Propane-공기, 및 Methane-Propane-공기의 三成分系 可燃性 混合氣體의 點火 Energy를 실험을 통하여 측정 한 결과를 Plot화하여 나타내면 그림 6 ~ 8과 같다.

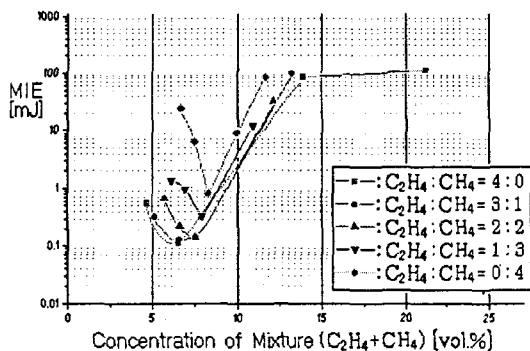


그림 6 Ethylene-Methane-공기 混合氣體의 點火 Energy (日本 産業安全研究所에서 測定; 1996.7.)

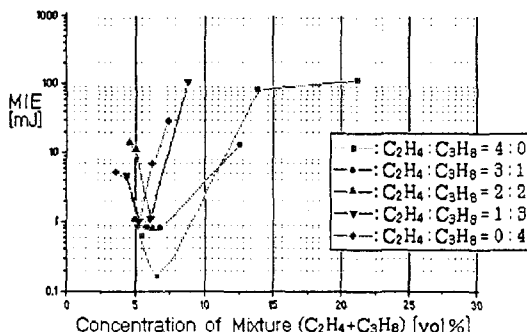


그림 7 에틸렌-프로판-공기 混合氣體의 點火 Energy

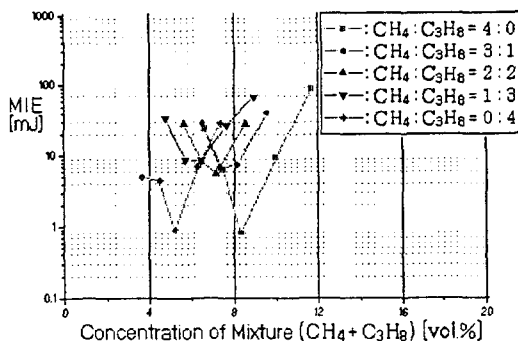


그림 8 메탄-프로판-공기 混合氣體의 點火 Energy

값과 대략 일치하지만 Condenser의 容量에 따라서 可燃性 Gas의 最小 點火 Energy의 變化가 크게 나타나므로 정확한 값을 얻기 위해서는 小容量의 Condenser (예를 들면 5 pF 등)가 필요하고 이 容量을 적절히 조절하는 것이 매우 중요하다. 實驗 結果를 정리, 요약하면 다음과 같다.

- (1) 單一 Gas일 때는 Ethylene Gas의 경우는 6.5 vol.%에서 最小點火 Energy (MIE)가 약 0.11 mJ로 나타났고, Methane Gas는 8.3 vol.%에서 MIE가 약 0.81 mJ로 나왔다. Propane Gas는 5.2 vol.%에서 MIE가 약 0.9 mJ로 測定됐다.
- (2) Ethylene과 Methane의 混合氣體의 경우, Ethylene의 混合比率이 증가할수록 MIE가 감소하였는데 Ethylene의 混合비가 半 以上이면 Ethylene 單一 成分일 때의 MIE와 거의 유사하게 나타났다 (0.16 mJ). 즉 Ethylene-Methane 混合氣體의 MIE는 MIE가 낮은 Ethylene에 의하여 영향을 많이 받는 것을 알 수 있다. 물론 이 混合氣體의 MIE와 燃燒範圍는 Ethylene과 Methane의 그것들 사이에 存在 한다. (그림 6)
- (3) Ethylene과 Propane의 混合氣體는 混合비에 거의 관계없이 MIE가 Ethylene의 MIE보다 모두 높아져서 Propane의 MIE와 유사하게 나타나고 있다 (0.79 mJ). 그러나 爆發範圍는 Propane의 그것보다 훨씬 넓어지고 있다. (그림 7)
- (4) Methane-Propane 混合氣體의 MIE는 어느 한 Gas가 단독으로 있을 때보다 훨씬 증가하는 것으로 나타났다. 즉 이 混合氣體는 단일 성분으로 있을 때보다 안전하다. 두 Gas가 50 : 50으로 混合되어 空氣중의 vol.%가 약 7.2 %일 때 MIE가 약 5.7 mJ로 나타났다. 爆發範圍의 上限界-下限界 각각 두 Gas의 上限界 사이와 下限界 사이에 존재하여 爆發範圍는 대체적으로 넓어지는 것으로 보여진다. (그림 8)

5. 결론

이 논문은 靜電氣의 放電 Energy가 可燃性 混合氣體의 點火源으로 작용하여 火災-爆發을 일으키는 것을 예방하기 위한 대책수립의 일환으로서 수행한

三成分系 混合氣體의 MIE 등을 규명하기 위한 점화에너지 측정연구에 관한 내용을 다뤘다.

본 연구에서는 두 가지 可燃性 Gas와 空氣로 이루어진 三成分系 混合氣體의 點火 Energy 測定 實驗을 실시하였고, 이 실험 Data를 바탕으로 하여 Ethylene-Methane-공기, Ethylene-Propane-공기 및 Methane-Propane-공기 등 3가지 可燃性 混合氣體의 點火 Energy를 측정하여 MIE를 구하였다.

혼합기체의 점화에너지 특성곡선들은 混合氣體의 MIE와 爆發範圍는 그 混合氣體를 구성하고 있는 單一 成分 Gas의 그것들과 判異함을 나타내고 있어, 우리가 混合氣體의 危險性を 함부로 豫測해서는 안된다는 사실을 보여주고 있다. 예를 들면, Ethylene과 Propane의 混合氣體는 混合比에 거의 관계없이 MIE가 Ethylene의 MIE보다 모두 높아져서 Propane의 MIE와 類似하게 나타나고 있고 (0.79 mJ), 爆發範圍는 Propane의 그것보다 훨씬 넓어지고 있다. 반면에 Methane-Propane 混合氣體의 MIE는 약 5.7 mJ로 나타나 어느 한 Gas가 단독으로 있을 때보다 훨씬 증가하여 單一 成分의 Gas로 있을 때보다 混合되어 있을 때 오히려 安全하다고 할 수 있다. 그러나 두 가지 이상의 可燃性 Gas가 混合될 때 安全을 위해서는 混合氣體의 MIE는 그 混合氣體를 구성하고 있는 여러 Gas들 중에서 MIE가 가장 낮은 것을 고려하고, 爆發範圍는 가장 낮은 下限界와 가장 높은 上限界 사이로 推定하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

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

[參考 文獻]

- [1] 李寬珩, 可燃性 混合物質의 最小點火 Energy에 미치는 靜電氣의 影響에 관한 研究 (I), 산업안전연구원, 연구보고서, 기안연 96-4-4, 1996. 12.
- [2] 李寬珩, 정전기에 의한 화재·폭발 재해의 예방, 산업안전연구원, 연구보고서, 기전연 94-6-8, 1994. 12.
- [3] 최상원 외, “三成分 가연성 혼합가스의 최소점화에너지 측정에 관한 연구”, 한국산업안전학회 '96추계학술연구발표회 논문초록집, pp. 121-126, 1996. 11.
- [4] 정재희 외, “가연성 혼합가스의 최소착화에너지에 관한 연구”, 한국산업안전학회 '95추계학술

논문발표회 논문초록집, 1995. 10.

- [5] 일본 靜電氣學會 (編), Handbook of Electrostatics, pp. 732-776, OHM社, 1981.
- [6] Y. Tabata (監修), 産業における 靜電氣 災害·障害の 防止, pp. 5-11, OHM誌 10月 別冊, オム社, 1995.
- [7] T. Kodama, “靜電氣의 現象と 災害·障害 防止技術”, 日本 勞働省 産業安全研究所 論文, 1996.
- [8] 秋田一雄, “最小發火エネルギーと火消炎距離”, 安全工學, Vol.7, No.4, 1968.
- [9] 春日電機株式會社, 放電着火試驗裝置 SP-2型仕様書, 1995年 12月.
- [10] IEC-DIS-31H(CO)17, Electrical Apparatus for Use in the Presence of Combustible Dust - Part 2.
- [11] National Fire Protection Association, NFPA 77: Recommended Practice on Static Electricity, 1988.