가스 분출시 정전기 대전에 의한 위험성 평가 장치 개발

서대원 · 정재희 · 안희석 · 이문형 · 김준호* · 홍성경*
Mizuki YAMAGUMA** · Tsutomu KODAMA**

서울산업대학교 안전공학과 · *한국가스공사 연구개발원
**일본 노동성 산업안전연구소

1. 서론

가연성 가스가 누출함에 따른 화재 및 폭발 재해는 공업화 사회에 있어서 방치될 수 없는 매우 중요한 문제이다. 기체, 액체, 분체가 단면적이 작은 분출구를 통해 공기 중으로 분출될 때 분출하는 물질과 분출구와의 마찰로 인해 정전기가 발생한다. 분출되는 물질과 분출구를 구성하는 물질의 직접적인 마찰에 의해서도 정전기가 발생하고, 분출되는 물질 구성입자들간 상호충돌에 의해서도 정전기가 발생된다.[1] 배관 내에 순수 천연가스가 이송 · 분출할 때의 대전량은 매우 작다.[2,3] 그러나, 배관 내에는 외부에서 Vent Stack으로 유입되는 먼지, 산화철(Fe_2O_3) 등의 Dust가 포함될 수 있으며 이러한 Dust와 배관과의 마찰로 인해 대전량이 크게 상승되는데[3,4] 이러한 대전량을 정량적으로 평가한 사례는 드물다.

따라서, 본 연구에서는 가스가 이송 · 분출할 때 발생하는 정전기 대전량을 정량적으로 평가하기 위한 장치 개발과 이의 기초실험으로 공기가 이송 · 분출할 때 발생하는 정전기 대전량을 Dust 량과 압력 변화에 따른 발생 추이와 정전기에너지를 비교, 분석하여 간접적인 천연가스 등 가연성 가스의 누출 및 분출시 정전기에 의한 화재 · 폭발 위험성 평가를 하고자 한다.

2. 대전전압 발생장치

본 장치는 가스가 배관 내에 이송할 때 발생되는 유동대전, 배관 끝에서 분출할 때 발생되는 분출대전, 분출된 Dust가 다른 물체와 충돌할 때 발생되는 충돌대전, 그리고 Faraday cage를 이용하여 Dust가 가지고 있는 전하량을 측정 할 수 있도록 제작하였다.

2.1 발생장치의 LAYOUT

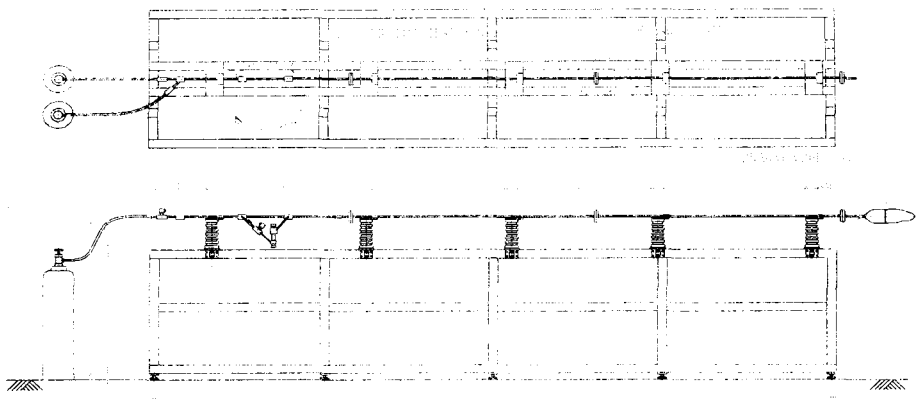


Fig. 1. 정전기 대전 발생장치의 LAYOUT

Fig. 1은 정전기 대전 발생장치의 설계도를 나타낸 것으로서 배관의 재질은 일반배관용탄소강관(SGP)스틸을 사용하였으며, 배관 길이는 4.5m, 직경 6mm이고, 분출되는 Dust를 Faraday Cage로 담을 수 있도록 수평으로 제작하였다. 또한, 실험목적에 따라 압력을 변화시킬 수 있도록 봄베에 압력조절기를 설치하였다. 대전된 정전기 누설을 방지하기 위하여 배관의 절연은 특고압 절연대를 사용하여 전기적인 절연을 유지하도록 하였다.

Dust Dispenser는 Fig. 2와 같은 구조이며 Dust의 연속공급과 일정량 공급을 할 수 있게 제작되었으며, 두 배관의 valve를 조절하여 그 차압에 의하여 Tank 내의 Dust를 배관으로 공급하게 되어있다.

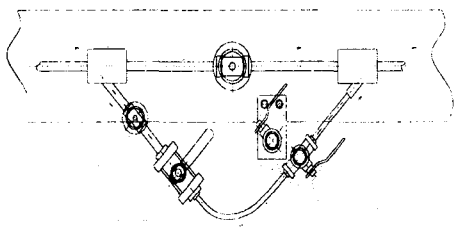


Fig. 2. Dust Dispenser의 구조

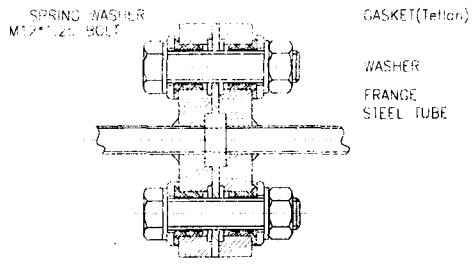
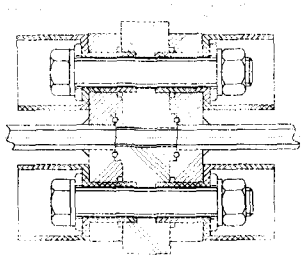


Fig. 3. Flange의 Insulation

Fig. 3은 각 구간별 절연 대책을 나타낸 것으로 각 구간별 유동대전, 분출대전 등의

특성 관찰을 위해 Flange를 Teflon Gasket를 사용하여 절연함으로서 대전된 정전기가 다른 구간으로 누설되지 않도록 하였다.



그러나, 실험과정에서 10,000V 이상의 높은 전압의 발생으로 각 구간 사이에 연면방전이 발생하여, 약 15,000V까지 절연 상태를 유지할 수 있도록 Fig. 4와 같이 현 4mm로 되어있는 Teflon Gasket을 20mm로 늘렸으며 볼트 주위도 절연을 향상시켰다.

Fig. 4. 개선된 Flange의 Insulation

2.2 Capacitance 및 측정전하량 계산

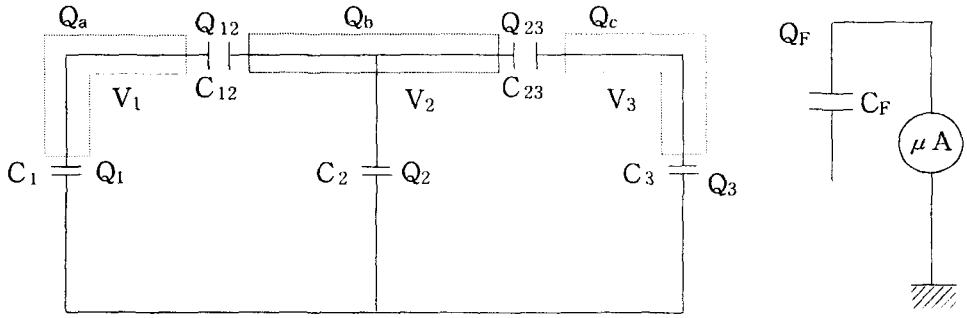


Fig. 5. 발생장치의 등가회로

Fig. 5는 정전용량 계산 회로도를 나타내며 계산방법은 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 π 단락 측정법을 적용하였다. 측정결과는

$$C_1 = 56pF,\ C_2 = 30pF,\ C_3 = 1pF,\ C_{12} = 14pF,\ C_{23} = 14pF$$

의 값이 계산되었다.

또한, 각각의 Capacitance에 Q_1, Q_2, Q_3, Q_{12}, Q_{23}이 대전되고 배관에 실제로 대전되는 Q_a, Q_b, Q_c, Q_F는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$Q_a = C_1V_1 + C_{12}(V_1 - V_2) = (C_1 + C_{12})V_1 - C_{12}V_2$$

$$Q_b = C_{23}(V_2 - V_3) + C_2V_2 - C_{12}(V_1 - V_2)$$

$$=(C_{12} + C_{23} + C_2)V_2 - C_{23}V_3 - C_{12}V_1$$

$$Q_c = C_3V_3 - C_{23}(V_2 - V_3) = (C_{23} + C_3)V_3 - C_{23}V_2$$

$$Q_F = Q_a + Q_b + Q_c$$

Where, Q_a : P_1에서의 전하량, Q_b : P_2에서의 전하량

Q_c : P_3에서의 전하량, Q_F : Faraday cage의 전하량

3. 공기 이송시 정전기 대전량 측정 실험

3.1 실험 방법

실험장치는 앞에서 설명한 정전기 대전 발생장치를 이용하였으며 실험 조건은 23±3℃, 45±5%RH로 하였다. 실험 방법은 아래의 Fig. 6과 같이 공기와 Dust를 동시에 공급하여 발생된 유동대전과 분출대전의 전위, 그리고 Faraday cage에 축적된 전하의 방전전류 값의 변화를 측정하였다.

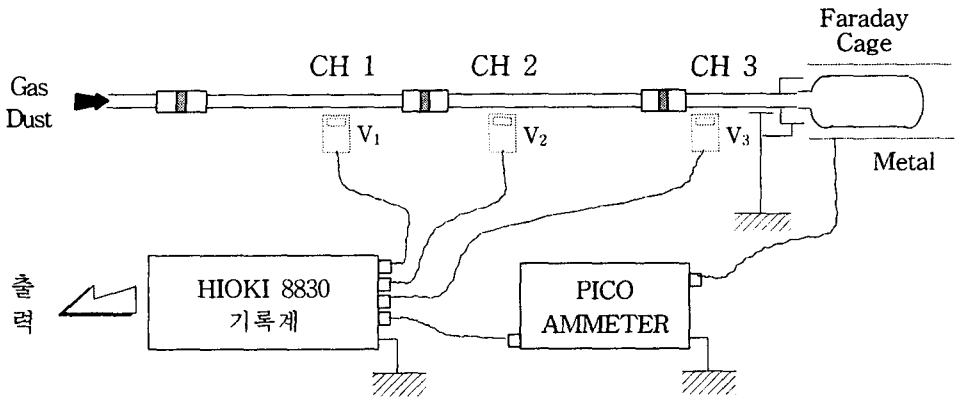


Fig. 6. 정전기 대전압 발생 장치

측정장치는 정전압 측정기 KSD 0103(KASUGA, Japan), 전류 측정기 PICO AMMETER(KEITHLEY, USA)를 이용하여 측정하였으며 기록은 MEMORY Hi CORDER 8830(HIOKI, Japan)을 이용하였다. 가스의 유동 및 분출 시 발생하는 대전전위를 측정할 수 있도록 배관 밑에 정전기 전위 측정기를 설치하여 배관 내의 가스와 Dust가 유동하면서 배관과 마찰에 의해 발생되는 정전기를 측정하도록 하였다.

측정은 일반 압축공기를 이용하였으며 Dust는 초기 산화철(Fe_2O_3, 황색, 입경 48μm)

을 이용하여 배관 내부로 주입시켰으며 구체적인 실험 내용은 다음과 같다.

[1] 일정 압력에서 Dust의 양의 변화에 따른 대전량의 변화

[2] 일정 Dust양에서 압력 변화에 따른 대전량의 변화

정전기에너지 값은[1,3]

$$W = \frac{1}{2} QV \quad [J]$$

이식에 의하여 측정한 에너지 값을 이용하여 천연가스 등 가연성 가스에 대한 화재 및 폭발 위험성에 대하여 평가하였다.

3.2 실험결과 및 고찰

3.2.1 정전기 대전전압

공기 이송시 발생된 전압을 측정하기 위하여 3개의 구간을 측정하였다. Fig 7은 압력 3kg/㎠에서 Dust량을 0.1g ~0.5g으로 변화시켜 대전전압의 증가 추이를 CH 1(a), CH 2(b), CH 3(c)별로 각각 나타낸 그림이다.

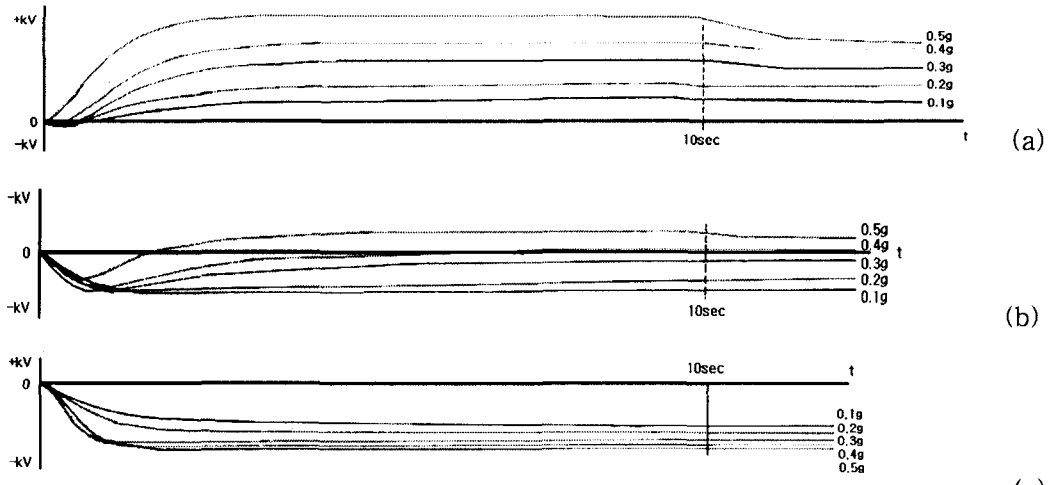


Fig. 7. Dust 변화에 따른 대전전압의 변화

위의 그림에서와 같이 0.5g 일 경우 CH 1은 13,100V, CH 2는 2,700V, CH 3은 -7,600V로 각각 대전되었으며 Dust 량이 증가함에 따라 대전전압도 증가함을 알 수 있

다. CH 1은 미스트 공급과 함께 대전이 시작되어 Q의 축적에 따라 전위가 직선성으로 상승하여 미스트의 공급이 소진됨과 함께 Q의 축적이 멈추므로 일정 전위로 유지되었으며, 배관과 마찰한 Dust는 (-)로 대전됨에 따라 측정된 배관의 전압은 (+)의 전압이 유도되었다. CH 2의 경우는 Dust의 공급이 CH 1구간에 대해 시간차가 생기는 동안 먼저 대전된 (+) 때문에 (-)로 역 대전이 일어나는 것으로서 CH 1과 CH 2사이의 정전용량(C_{12})에 의한 현상으로 판단된다. 그러나 CH 1에서 대전되지 않은 일부 Dust가 CH 2구간에서 대전이 일어나고 이에 따라 (+)전위로 역전되는데 이러한 현상은 Dust가 증가함에 따라 현저히 나타남을 알 수 있다. 또한, Dust의 대전은 CH 2까지의 구간에서 이루어지고 CH 3구간에서는 거의 일어나지 않는 것으로 생각되어 CH 2를 상대적으로 C_{23}사이에 충전된 전위가 CH 3의 전위를 (-)로 유지하는 역할을 하는 것으로 판단된다. 그러나, CH 1, CH 2, CH 3 각각의 대전전압 정부의 결정은 여러 변수가 있기 때문에 향후 여러 다양한 각도에서 분석해야 할 것이다.

3.2.2 전하량

Dust 및 압력 변화에 따른 전하량의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 압력의 변화에 따른 변화는 Dust를 0.3g에서 압력을 1kg/㎠ ~ 5kg/㎠으로 변화시켰으며 Faraday cage에서 측정된 전류(i)를 복합사다리꼴에 의한 방식으로 적분한 값을 나타내었다.

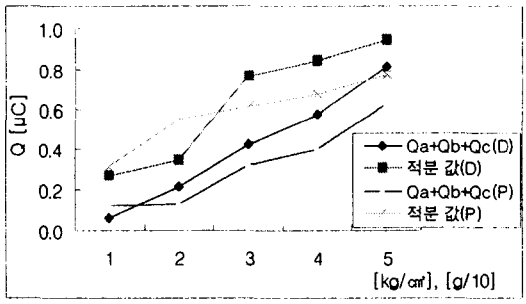


Fig. 8 Dust 및 압력에 따른 전하량 변화

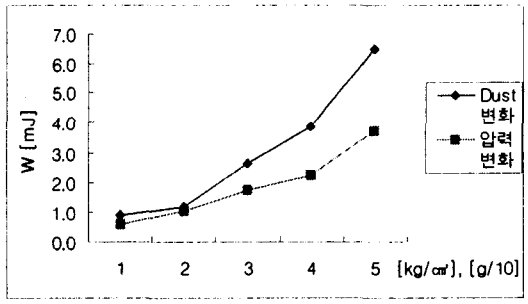


Fig. 9 Dust 및 압력 변화에 따른 정전기 에너지

그림에서 보는 바와 같이 5kg/㎠에서의 전하량은 0.63μC, Q_F 값은 0.77μC이었으며 0.5g에서는 0.81μC, Q_F 값은 0.95μC 이 나타났다. Dust 및 압력이 증가함에 따라 전하량의 값도 현저히 증가하였으며 전하량은 압력보다 Dust 량에 따라 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 그러나, Q_a+Q_b+Q_c의 값이 Q_F 값보다 적게 나타났는데 이는 초기의 역 대전에 대한 일부 전하의 중화현상 때문인 것으로 판단된다.

3.2.3 정전기 에너지

정전기 에너지의 변화 추이를 Fig. 9에 나타내었다. 0.5g에서 6.52mJ, 5kg/㎠에서 3.72mJ의 값을 얻었으며 같은 변화 비율에서 Dust의 중량 변화가 압력변화보다 약 2배 가량 더 큰 에너지 값이 나타났다. 모든 가연성가스의 최소착화에너지가 1.0mJ(CH_4, 0.28mJ) 이상으로 이 결과는 천연가스 등 가연성가스의 화재·폭발 분위기가 조성되면 점화원이 되어 화재·폭발을 일으킬 수 있는 것으로 나타났다. 그러나, 이는 향후 여러 변수 요인에 대한 추가 실험을 통해 정밀한 분석이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

가스 이송시 발생되는 대전전압을 측정하기 위하여 정전기 대전 발생장치를 개발하여 이 장치의 기초실험을 하였다. 실험은 압력, Dust양에 따른 대전전압의 변화 추이를 관찰하기 위한 실험을 하였으며 그 결과, 대전전압은 Dust 양의 변화에 대한 대전전압의 증가 추이가 압력 변화일 때보다 더욱 현저히 증가함을 알 수 있었다. 또한, 이상적으로는 $Q_a+Q_b+Q_c = Q_F$ 가 되어야 하나 실험결과에 의하면 $Q_a+Q_b+Q_c < Q_F$로 나타났는데 이는 초기 CH 1구역의 대전에 대한 CH 2구역의 역 대전현상과 이후 일부 전하의 중화현상 때문인 것으로 판단되며 추후 이에 대한 정밀한 분석이 되어야 할 것이다. 정전기 에너지 값은 Dust 0.5g에서 6.52mJ, 5kg/㎠에서 3.72mJ의 값을 얻었다.

이 결과는 가연성가스 등이 화재 및 폭발 분위기가 조성되면 충분히 점화원이 될 수 있어 매우 위험한 것으로 나타났다. 따라서, 가연성가스의 공급 계통에서는 가스의 분출사고시 정전기에 의한 화재 및 폭발을 방지하기 위하여 배관 내 잔류 Dust의 제거기술 및 이에 따른 철저한 관리대책이 수립되어야 할 것으로 판단된다. 아울러, 향후 더 많은 실험과 축적된 Data를 통하여 정밀히 분석이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

감 사

본 연구는 한국가스공사 연구개발원의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1) 정재희 외 5, "전기안전공학", 동화기술, 1998

2) 이덕출·정재희 공역, "정전기재해와 장해 방지", 성안당, 1996

3) "最新 靜電氣 ハンドブック", 靜電氣學會, 1998

4) "管内固気二相流에서의 粒子 静電気와 그 応用, 日本 静電気学会誌, Vol.23, No 2, 1999