

접지형태에 따른 배관의 고체·기체 2상류에서의 정전기 대전과 화재·폭발 위험성 평가

김성준·정재희·서대원·김준호·홍성경

“Tsutomu KODAMA·“Mizuki YAMAGUMA·”정연해·”이기철

서울산업대학교 안전공학과·*한국가스공사 연구개발원

일본 노동성 산업안전연구소·*한국전력기술인협회

1. 서론

현대사회의 공업화 및 도시화에 따라 NG(Natural Gas)를 포함하는 일반 가연성 가스의 누출에 의한 화재 및 폭발 재해는 매우 중요한 문제이다. 기체, 액체 및 분체가 단면적이 작은 분출구를 통해 공기중으로 이송 및 분출될 때 분출물질과 분출구와의 마찰로 인해 정전기가 발생한다.¹⁾ 배관 내에 순수 NG가 이송·분출될 때의 대전량은 매우 작다.^{2,3)} 그러나, 배관 내에는 벤트스택 등 외부에서 유입되는 먼지 또는 배관내의 부식에 의한 산화철(Fe_2O_3) 등의 분체가 포함될 수 있으며 이러한 분체가 천연가스 등과 함께 분출될 때 배관과의 마찰로 인해 대전량이 크게 상승된다.^{3,4)} 또한 분출되는 물질 구성입자들간 상호충돌에 의해서도 대전량은 더욱 증가하게 된다.⁵⁾

따라서, 본 연구에서는 자체 제작한 NG수송배관을 이용하여 배관의 접지상태, NG공급압력, 공급분체의 변화에 따른 정전기 대전현상 및 그 영향을 평가하여 대전량 및 정전기 에너지를 비교 분석하였으며, 그로 인한 NG를 포함하는 일반 가연성 가스의 화재·폭발 위험성을 평가하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 정전기 대전량 측정 장치의 구성도를 나타냈다. 배관의 재질은 일반 배관용 탄소강관(SGP, 4.5m, ϕ 6mm)을 사용하였으며, 분출되는 분체를 Faraday Cage(Copper 99.9%, L:290mm, H:0.2mm, ϕ 130mm, Filter:면100%)로 담을 수 있도록 수평형으로 제작하였으며, 배관과의 영향을 최소화하기 위하여 실드를 하였다. 실험상 NG의 압력을 변화시키기 위해 봄베 상부에 압력조절기를 부착하였다. 또한, 분진 공급기의 구조는 주

배관과 보조배관의 차압에 의하여 분진을 배관내로 공급했다.

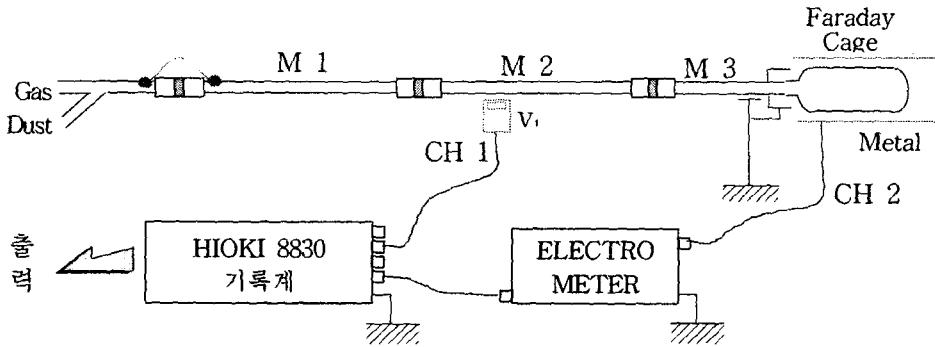
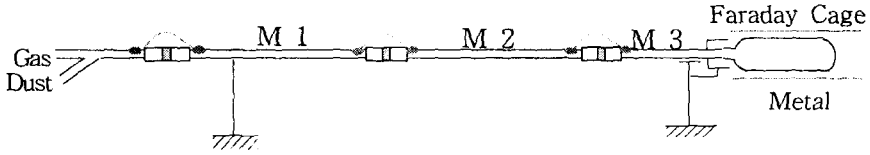


Fig. 1 정전기 대전량 측정 장치의 구성도

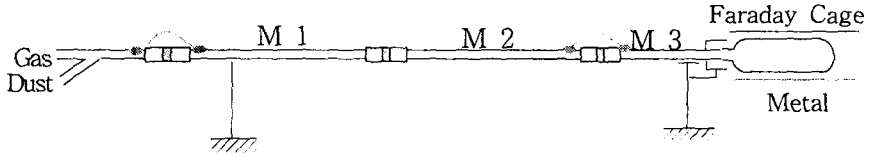
대전된 정전기의 누설을 방지하기 위하여 배관의 절연은 특고압 애자를 사용하여 전기적인 절연을 유지하도록 하였다. 각 구간별 절연 대책은 유동대전, 분출대전 등의 특성 관찰을 위해 Flange에 테플론 가스켓을 사용하여 절연함으로써 대전된 정전기가 다른 구간으로 누설되지 않도록 하였다.

실험용 분체는 초기 산화철(Fe_2O_3 , 황색, 저항률; $6.4 \times 10^8 \Omega \cdot m \sim 3.5 \times 10^8 \Omega \cdot m$)과 아크릴(저항률: $10^{15} \sim 10^{16} \Omega$)³⁾을 사용했다. 또한, 분체의 입경을 일정하게 하기 위해 매쉬(호칭 번호: 100, KS-A5101)로 1차 전처리를 하였으며, 그 결과 평균 입경(Micro Color Camera: CS5330, Surface Finish Microscope)은 초기 산화철이 $4 \mu m$ 로 나타났으며 아크릴은 $40 \mu m$ 로 나타났다. 실험 조건은 $20 \pm 3^\circ C$, $40 \pm 5\% RH$ 의 환경 조건에서 NG($1 \sim 5 kg/cm^2$)와 일정량의 분진($0.1 \sim 0.5 g$)을 10초 동안 동시에 공급한 뒤, 배관 내에 발생된 유동 대전량 및 분출시의 대전량을 중심으로 측정하였다. 측정장치는 정전압 측정기 KSD 0103(KASUGA, Japan), 전압 측정기 ELECTRO-METER (KEITHLEY, USA)를 사용하였으며, 기록계(MEMORY Hi RECORDER 8830, HIOKI, Japan)를 사용하였다.

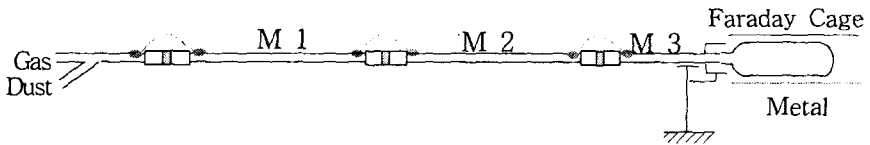
Fig. 2는 정전기 대전 측정 장치의 접지형태에 따른 분류로써, 배관 부분접지시 배관의 비접지 구간은 1.75m이며, 각 접지형태별 정전용량을 측정($C_b = 78 pF$, $C_c = 121 pF$, $C_f = 52.2 nF$)하였다. (C_b :부분접지시 비접지 구간의 정전용량, C_c :비접지시 배관의 정전용량, C_f : Faraday Cage의 정전용량) 또한, 정전기에너지(W)는 정전용량(C)와 전압(V)를 측정한 뒤, $W=1/2QV$ 를 이용하여 계산했다.



(a) 배관 전체접지(M1, M2, M3 결선)



(b) 배관 부분접지(M1 접지, M2, M3 결선)



(c) 배관 절연(비접지)

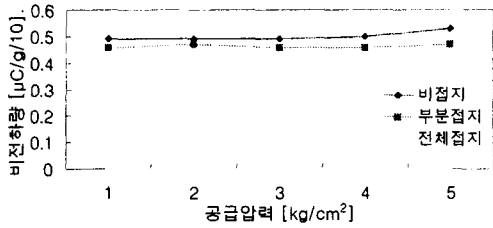
Fig. 2 측정장치의 접지형태에 따른 분류

3. 실험결과 및 고찰

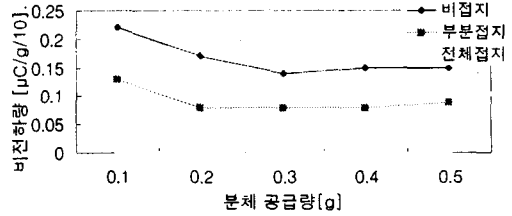
3.1 배관 및 분체의 대전

3.1.1 공급압력의 영향

공급압력이라는 것은 배관 내의 기류를 발생하기 위한 NG 봄베의 레귤레이터 2차측의 압력이다. 본 실험결과 Fig. 3에 나타난 바와 같이 배관의 공급압력이 높아짐에 따라 산화철 대전량(비전하량)이 증가했다. 이는 공급압력의 증가에 따라 분체입자와 배관 내벽이나 입자끼리의 접촉이나 충돌이 격심하게 되어 대전에 영향은 준 것으로 판단된다. 또한 공급압력이 높아지면 분말이 균일하게 분산되어 유동되기 때문에²⁾ 충돌횟수가 많아져 더욱 접촉이나 충돌, 마찰이 강해져서 대전량이 커진 것으로 판단된다. 그러나 아크릴의 경우는 부분접지와 비접지가 미소차이를 보였다.



(a) 배관(아크릴 0.3g)

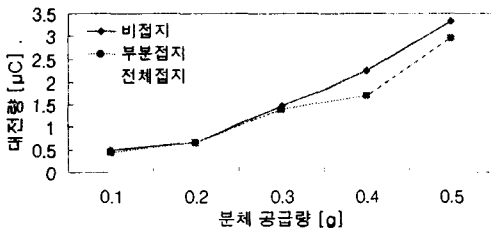


(b) 배관(산화철 0.3g)

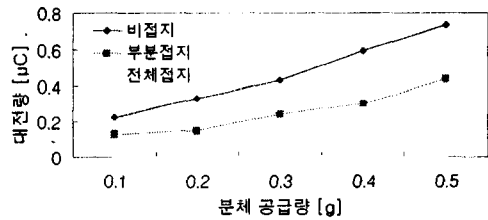
Fig. 3 공급압력 변화에 따른 비전하량

3.1.2 분진공급량에 대한 영향

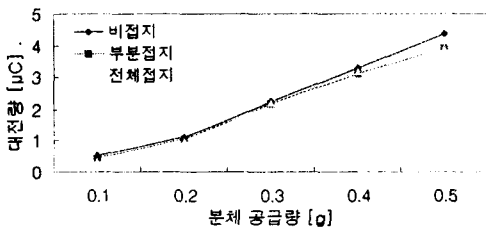
아크릴과 산화철 0.1~0.5g(압력 2kg/cm²)에서의 대전량을 Fig. 4에 나타내었다. 실험결과에서 보듯 아크릴과 산화철 모두 전하량은 분체량의 증가에 따라 증가하는 것으로 나타났다. Faraday Cage의 대전량은 아크릴의 경우 접지에 상관없이 대전량이 거의 동일하게 나타난 반면 산화철은 접지형태에 따라 대전량이 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 전기저항률이 큰 아크릴의 경우 전하유지능력이 크기 때문에 대전된 전하가 접지를 통한 누설이 매우 적은 것으로 판단된다.



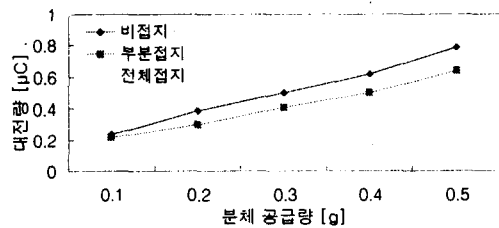
(a-1) 배관(아크릴, 압력 2kg/cm²)



(a-2) 배관(산화철, 압력 2kg/cm²)



(b-1) Faraday Cage (아크릴, 압력 2kg/cm²)



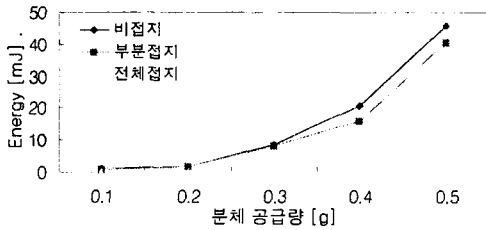
(b-2) Faraday Cage (산화철, 압력 2kg/cm²)

Fig. 4 분체 공급량에 따른 대전량

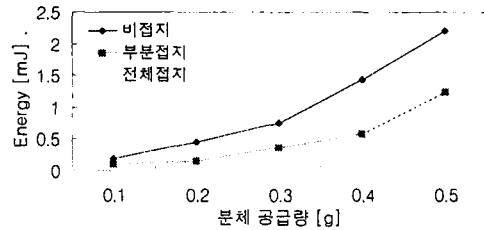
3.2 화재 · 폭발 위험성 고찰

3.2.1 배관 대전구간

정전기 에너지와 분체공급량(0.1~0.5g) 및 압력변화(1kg/cm²~5kg/cm²)의 관계를 Fig. 5, Fig. 6에 나타냈다. 결과에 의하면, 비접지의 경우 분체공급량 0.1g, 압력 1kg/cm²에서 산화철은 0.2mJ, 0.22mJ의 에너지 값이 산출되었으며, 아크릴은 0.98mJ, 1.48mJ의 에너지 값이 산출되었다. 또한 부분접지와 비접지시 분체 및 압력이 증가함에 따라 정전기에너지도 현저히 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 전체접지시 정전에너지는 모두 0으로 나타났다.

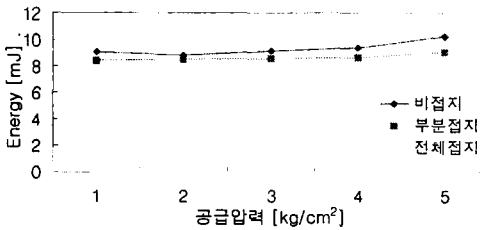


(a) 배관(아크릴, 압력 2kg/cm²)

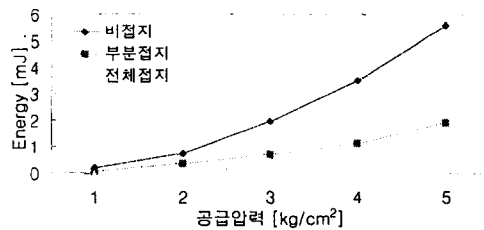


(b) 배관(산화철, 압력 2kg/cm²)

Fig. 5 분체 공급량과 정전기에너지(W)



(a) 배관(아크릴 0.3g)



(b) 배관(산화철 0.3g)

Fig. 6 공급압력 변화와 정전기 에너지(W)

3.2.2 분체 분출구간(Faraday cage)

Fig. 7과 Fig. 8은 배관 끝에서 분출될 때의 Faraday cage에서 측정된 분체의 총 정전기에너지 값을 나타냈다. 부분 접지시 분체공급량 0.1g, 압력 1kg/cm²의 경우에 산화철은 0.47mJ, 0.52mJ, 아크릴은 1.85mJ, 46.62mJ의 에너지 값이 산출되었으며, 분체 및 압력이 증가함에 따라 정전기에너지도 현저히 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 아크릴의 경우 접지의 영향은 거의 받지 않는 것으로 나타났다.

특히, 배관구간에서 나타난 정전기 에너지 값보다 매우 높게 나타남으로 배관구간보

다 더욱 큰 위험성을 가지고 있는 것으로 나타났다. 이는 NG 및 LPG 등 대부분 가연성가스 및 증기의 최소착화에너지가 0.3mJ 이하인 것을 고려할 때 화재·폭발의 위험성이 높은 것으로 나타났다. 즉, 미소 분체량에서도 매우 큰 위험성이 내포되어 있는 것으로 판단된다.

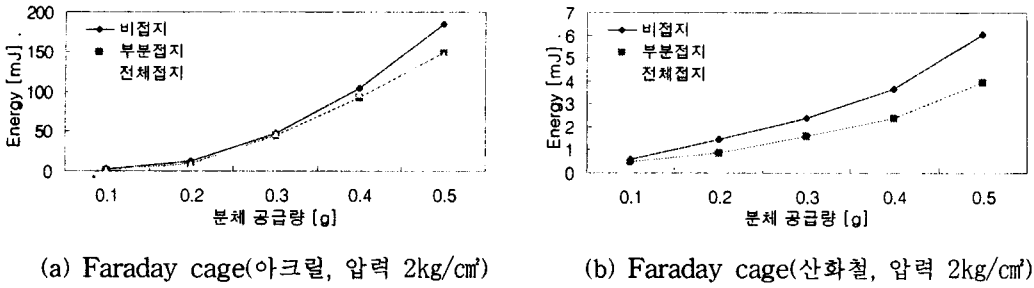


Fig. 7 분체 공급량과 정전기 에너지(W)

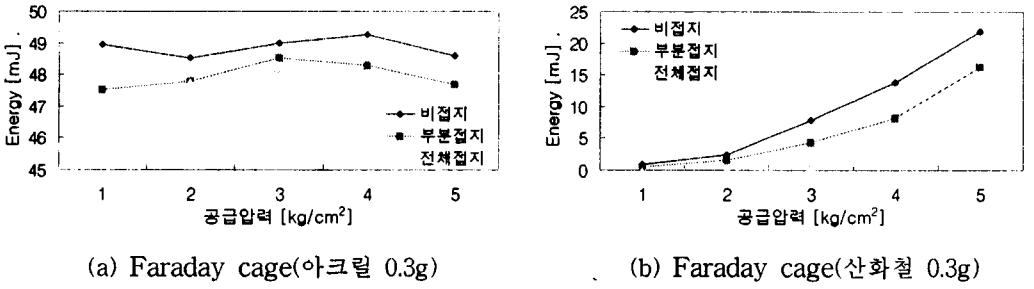


Fig. 8 공급압력 변화와 정전기 에너지(W)

4. 결론

자체 제작한 NG수송배관을 이용하여 배관의 접지상태, 공급 분체의 종류, 공급압력에 따른 정전기 대전현상 및 그 영향에 대해 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 접지형태에 따른 배관구간의 대전량은 아크릴 분체와 산화철 분체 모두 접지에 의해 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 분출대전구간(Faraday Cage)의 대전량은 산화철의 경우 접지에 의해 감소하는 반면, 저항률이 높은 아크릴의 경우 접지에 의한 영향이 거의 없음을 알 수 있다.
- 2) 산화철은 분체 및 압력이 증가함에 따라 정전기 에너지도 현저히 증가하는 것으로 나타났다. 아크릴은 분체량 증가에 따라 정전기 에너지가 증가하지만 공급압력 증가

에서는 $1\text{kg}/\text{cm}^2$ 이하에서 포화되어 거의 일정한 값으로 나타났다.

- 3) 배관대전구간과 분출대전구간(Faraday Cage) 모두 NG 및 LPG를 포함한 대부분의 일반 가연성 가스의 화재 및 폭발을 일으킬 수 있는 착화원이 될 수 있는 것으로 나타났다.
- 4) 따라서, 가연성가스의 공급 계통에서는 가스의 분출사고시 정전기에 의한 화재 및 폭발을 방지하기 위하여 배관의 접지는 물론이고, 배관 및 맨트스택 등 내부 잔류 분진의 제거 기술 및 높은 저항률의 분진에 대한 철저한 추가 관리대책이 수립되어야 할 것으로 판단된다.

5. 향후과제

- 1) 분진의 종류, 특히 저항률이 높은 분체 등의 영향
- 2) NG 및 가연성가스 종류에 따른 대전량의 변화 평가
- 3) 배관 형상 및 유속에 따른 대전량과 정전기 에너지 변화

감사의 글

본 연구는 한국가스공사 연구개발원에서 일부 지원되어 수행되었기에 여기에 기입하여 감사를 표함

참고문헌

- 1) 정재희 외 5인, “전기안전공학”, 동화기술, 1998
- 2) 이덕출·정재희 공역, “정전기재해와 장해 방지”, 성안당, 1996
- 3) “最新 靜電氣 핸드북”, 靜電氣學會, 1998
- 4) “管内固氣二相流における粒子靜電氣とその應用”, 日本 靜電氣學會誌, Vol.23, No 2, 1999
- 5) “粉體の帶電現象と機構”, 日本 靜電氣學會誌, Vol.23, No 2, 1999