

유동대전에 의한 정전기 특성 분석

김길태 · 이재근[†]

부산대학교 기계공학부

(2005. 3. 14. 접수 / 2005. 8. 10. 채택)

Analysis of Characteristics on the Static Electricity by Streaming Electrification

Gil-Tae Kim · Jae-Keun Lee[†]

Department of Mechanical Engineering, Pusan National University

(Received March 14, 2005 / Accepted August 10, 2005)

Abstract : The static electricity by thinner flow and discharge energy is investigated experimentally for the purpose of preventing the electrostatic discharge and damage. Test system for evaluating streaming electrification consists of a teflon pipe, a reservoir tank, a pump, flowmeters and an electrometer. When dielectric liquid flows through a pipe from one vessel to another, the potential difference generated in the collecting vessel is due to the accumulation of charges. These charges result from the convection of a part of the electrical double layer existing in the tube at the contact between the liquid and the inner wall. When the fluid velocity increases, the electric current increases proportionally. The charging current and accumulated charges by streaming electrification at the thinner velocity of 40cm/s, are measured a range of 5 nA and 0.27 μ C respectively. This amount of static discharge energy generated by streaming electrification is enough to ignite flammable solvent. Therefore surface electric potential should decrease by using electrostatic shielding and ground.

Key Words : streaming electrification, electrostatics, tetrachloroethylene

1. 서 론

정전기로 인한 재해는 현대 사회의 각 분야에서 다양하게 발생하고 있다. 정전기에 의한 재해는 원재료, 제품, 기기류 등 공정내의 여러 가지 물체에 전하의 축적으로 인해 발생하는 전하량이 어느 정도 되는지 파악해야 하지만, 정전기 측정은 재현성의 부족으로 인과관계를 설명하기에 매우 힘이 든다. 절연성 액체가 고체 절연체표면과 접촉하면서 유동할 때에 발생하는 유동대전(streaming electrification) 현상은 1950년대에 Quincke에 의해 발견되었으며^{1,2)} 이 현상은 액체의 절연성이 우수할수록 현저하게 나타나고³⁾, 정전기가 원인이 되어 발생하는 재해 중 이 현상에 의한 것이 많은 부분을 차지하고 있다. 석유공업에서 제품의 수송과정이나 항공기 기체

내의 연료보급 등과 같은 많은 과정에서 유동대전 전하에 의한 전기가 원인이 되어 폭발·화재 등의 심각한 재해가 발생되어 왔다.

Fig. 1은 유동대전의 원리를 나타내는 그림으로, 유동대전은 기본적으로 고상·액상의 양상 계면에서 발생하는 유체중 이온의 선택흡착 현상에 의한 것으로 대전도(charging tendency)에 영향을 줄 수 있는 인자는 액체의 종류, 유량, 온도, 함유된 불순물의 종류 및 함유도 등이 있으며 또한 고체 절연체의 종류, 표면상태, 유로형상 등이 있다²⁾. 대전에 의한 사고 방지책은 대전량을 감소시키는 방법으로, 전하 발생을 억제 또는 발생된 전하를 완화시켜 전하가 고체 절연체 표면이나 절연유 중에 축적되지 않도록 하는 것인데, 대전도와 유량, 온도, 유온과의 관계를 고려하여 최적의 유량으로 작동시킴으로써 대전도를 극소화 시키는 방법 등이 있다.

[†] To whom correspondence should be addressed.
jklee@pusan.ac.kr

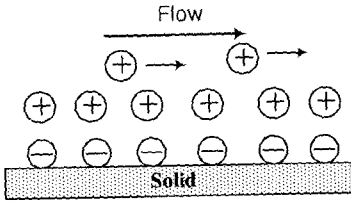


Fig. 1. Principles of streaming electrification.

본 연구에서는 유동대전에 영향을 미치는 여러 중요인자인 유체의 속도 변화에 따른 정전기 대전량을 정량적으로 측정을 해보았다. 그리고 유체가 유동하면서 발생할 수 있는 분사와 충돌대전에 대해서도 정량적으로 측정해 보았다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

유동대전 현상을 규명하기 위하여 일반적으로 유체에서의 정전하 또는 전류를 직접 측정하거나, 고체로부터의 누설전류를 측정하는 방법을 흔히 사용한다. 이러한 방법들은 개루프시스템과 폐루프시스템의 두 가지 형태로 분류되고 있다. 실험실 규모의 실험에서는 일반적으로 상·하위 두개의 탱크를 이용한 개루프시스템을 사용하는데, 상위탱크를 액체로 채우고, 가스로 압축시켜 액체를 대전 파이프를 통하여 하강시키는 방법이다. 이 방법은 대전 전하의 측정이 테스트 파이프와 하위탱크 두 곳에서 가능하기 때문에 두 값을 비교하여 해석하기에 용이하다. 그러나 일정정도의 자료를 얻기 위해서는 상당히 많은 양의 질연유와 시간이 필요하며⁴⁾, 대전 방지제 등을 첨가하여 연속적으로 측정하기가 곤란하다는 단점을 갖고 있다. 본 실험에서는 펌프로 테스트 파이프를 통하여 액체를 강제 순환시켜 테스트 파이프와 유체 계면에서 전하를 분리시켜 유동대전을 발생시키고, 테스트 파이프에서 대전량을 측정하는 폐루프시스템을 사용하였다.

Fig. 2는 유동에 의한 정전기 대전량을 측정하기 위한 실험 장치 개략도이다. 작동유체로는 신너(tetrachloroethylene)를 사용하였으며, 실험 장치는 유체를 공급 시키는 펌프, 유체를 저장하고 대전을 중화시키기 위한 저장 탱크, 유량 측정을 위한 유량계, 대전전류를 측정하기 위한 일렉트로미터, 일렉트로미터로부터 나오는 데이터를 처리하는 컴퓨터로 구성되어 있다. 파이프 부위는 외부로부터 발생하는 노이즈를 제거하기 위해 electrostatic shield steel mesh

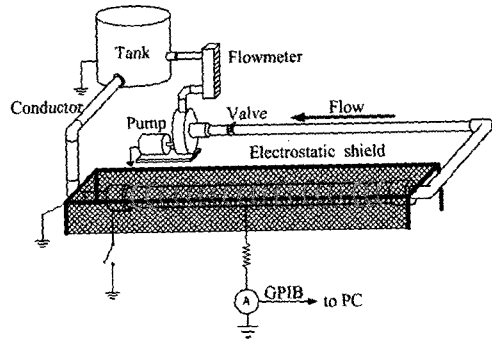


Fig. 2. Experimental apparatus for measuring streaming electrification.

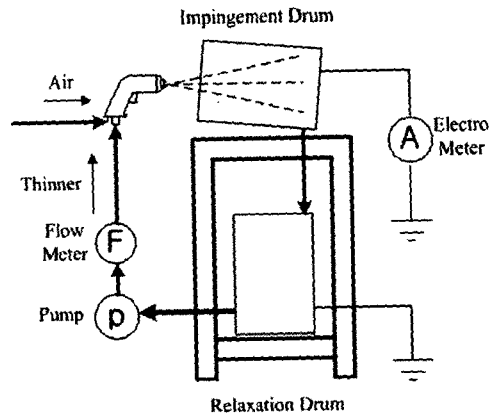


Fig. 3. Experimental apparatus for measuring impinging electrification.

를 사용하였으며 유동대전 전류는 파이프를 통해 누설되는 전류를 측정함으로써 평가하였다. 정전기의 발생 및 완화는 온습도에 많은 영향을 받는다. 그래서 본 연구에서 모든 실험은 가습기, 제습기, 히터, 쿨러로 이루어진 항온항습실 내에서 이루어졌다. 온도 25℃, 상대습도 40%에 조건에 고정하여 모든 실험을 수행하였다.

Fig. 3은 유동대전으로 인해 발생하는 분사 및 충돌대전 실험을 위한 장치이다. 실험 장치는 작동 유체를 스프레이 노즐을 통해 분출하는 분출부와 분출된 유체와 충돌을 일으키는 충돌부, 그리고 사용된 유체를 회수하는 장치로 구성되어 있다. 대전은 노즐의 팁에서의 전류를 측정하였으며 충돌대전은 충돌판에서의 전류를 측정하였다.

2.2. 유동대전 측정방법

일반적으로 액체의 유동, 분출 등에 따라 발생하는 전류는 일반적으로 $10^{-6} \sim 10^{-11}$ A 정도의 미량이기

때문에 사용되는 전류 측정기로서는, 피코암피터 또는 일렉트로미터를 사용한다. 발생전하량 시간이 한정되어 있는 경우에는 축전기, 콘덴서와 정전 전압계를 사용해 전류의 적분 값을 측정하여 유동대전으로 인해 발생하는 전하량을 구하였다. 본 실험에서는 유동대전을 측정하기 위해서 디지털 일렉트로미터에서 샘플링한 전류, 전압 값을 GPIB(general purpose interface board)를 통해 컴퓨터로 전송시키고 visual basic을 이용해 제작된 프로그램에 의해 알기 쉽게 visual화 시켰다. 전압·전류, 샘플링 간격, 샘플링 회수 등을 선택 할 수 있게 하였으며, 샘플링 간격은 0.2~37회/sec, 샘플링 회수는 10~10,000회의 범위를 가진다.

3. 실험결과 및 분석

3.1. 유동대전량 측정 및 분석

유동대전에 가장 많은 영향을 미치는 유속의 변화에 따른 발생전류의 값을 측정하였다. Fig. 4는 유속 변화에 대한 발생전류의 변화량을 측정한 결과 그래프이다. 유속이 증가함에 따라 유동대전 전류가 증가함을 볼 수 있다. 일반적으로 유동에 의해 발생하는 전류는 수 nA의 수준으로 상당히 작은 값이지만 지속적으로 발생하여 전하가 축적된다는데 그 문제점이 있다. Fig. 4에서 측정된 값은 수 nA의 매우 작은 값을 보이고 있다. 그러나 Fig. 5의 유속 40cm/s의 결과를 보면 전하들이 계속 축적이 되어 유동이 시작 후 60초 만에 0.27 μ C 정도의 전하가 축적됨을 알 수 있다. 일반적으로 0.1 μ C의 전하가 쇠국자(metal scoop) 크기의 대전체로부터 방전하는 경우 0.1mJ의 방전에너지지를 가지는 것으로 알려져

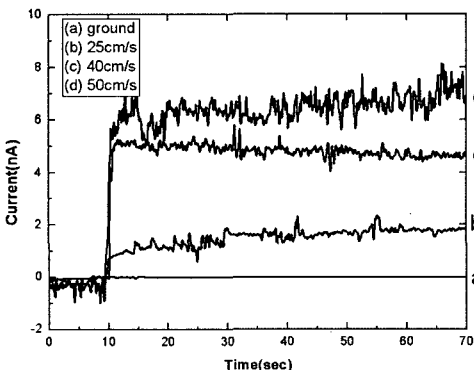


Fig. 4. Streaming electrification as a function of fluid velocity using the thinner.

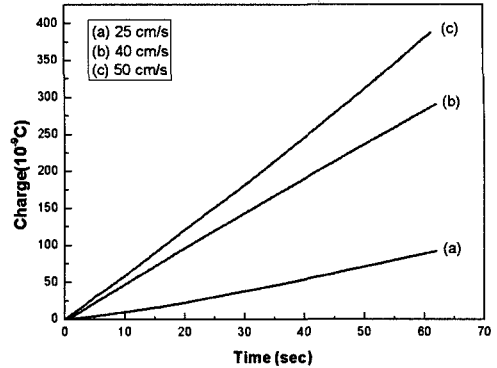


Fig. 5. Charge accumulation as a function of working time using the thinner.

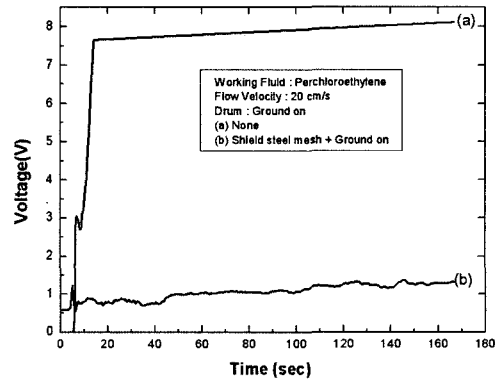


Fig. 6. Streaming electrification and effect of electrostatic shielding (sampling at insulated pipe).

있다.⁵⁾ 인화성 유기용제의 최소발화에너지는 0.1mJ 정도의 크기를 가지기 때문에 오랜 시간 전하의 축적은 발화를 불러일으킬 가능성이 아주 크다고 판단된다⁶⁾. 따라서 파이프 표면의 누설 전류를 강제적으로 완화 시켜주어야 한다.

Fig. 6은 polyethylene(PE) 파이프에 정전 차폐물(electrostatic shielding)을 설치하고 대전 전류를 측정 한 결과 그래프이다. 정전 차폐를 설치하지 않은 PE 파이프의 경우 표면이 약 8V로 대전된다. 그러나 접지된 정전 차폐물을 설치하였을 경우 대전전위는 약 1V 정도가 됨을 알 수 있다. 정전기상의 도체를 포함한 저항률이 $10^8 \Omega \cdot m$ 이하의 물체는 접지에 의해 대전된 정전기를 완전히 제거할 수 있지만, 물질의 저항률이 $10^{12} \Omega \cdot m$ 이상에서는 접지에 의한 효과가 작기 때문에 부도체 파이프에서는 단순히 접지만을 통해서서는 대전전위를 낮출 수 없다. 이런 경우 표면전체에 도체 코일을 이용한 정전차폐물을 관 외부에 설치해야한다. 차폐용 도체는 피

치 2~3cm 이하의 금속 망이나 나선형 철사를 사용한다. 하지만 차폐용 도체가 접지되지 않으면 이것이 정전기 유도에 의하여 전위가 상승하여 오히려 위험한 상태가 된다^{7,8)}.

3.2. 분출대전 및 충돌대전 분석

분출 및 충돌대전은 유동대전과 마찬가지로 유체의 흐름에 의해 발생하지만 분출대전은 기체, 액체 및 분체류가 통과할 때 물체와 분출관과의 마찰에 의해 발생하므로, 발생 부위가 노즐의 입구에서 마찰로 인해 발생한다는 점에서 약간 차이가 있다. 충돌대전은 두 물체 간의 충돌에 의해서 빠르게 접촉, 분리가 행해지기 때문에 정전기가 발생하는 현상이다⁹⁾. 분사대전은 노즐의 팁에서 누설되는 전류를 측정하였으며 충돌대전은 분사 후 충돌판에서 측정을 하였다.

Fig. 7의 그래프는 시간에 따른 분출대전으로 인해 발생하는 전류를 측정된 값이다. 분사 노즐 팁에서 측정된 전류는 약 -13nA의 값을 가진다. 그와 반대로 Fig. 8의 충돌판에서 측정된 전류는 약 10nA의 값을 나타내고 있다. 이와 같이 측정된 전류 값이 반대극성을 나타내는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 1의 그림을 살펴보면 고체와 액체의 경계면에 전기적 이중층이 형성되는데 고체가 도체인 경우는 누설 전류가 내부와 같은 극성을 가지게 된다. 충돌 대전의 경우도 충돌판이 도체이기 때문에 전기적 이중층의 분리에 의해 (+)로 대전된 유체와 같은 극성을 가지게 된다. 충돌 및 분사대전의 크기도 수 nA의 수준이지만 유동대전과 마찬가지로 지속적인전류의 흐름은 전하의 축적을 야기시켜 위험을 초래 할 수 있으므로 정전차폐와 접지를 통하여 대전 전위를 낮춰 주어야 분출과 충돌대전으로 인한 사고를 예방할 수 있다.

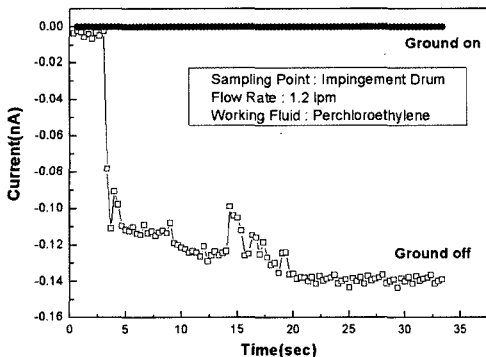


Fig. 7. Charging current as a function of working time by spraying electrification using the thinner.

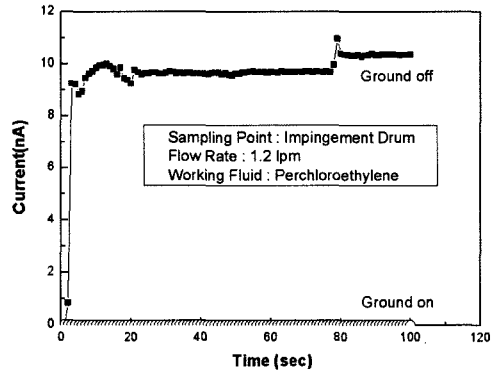


Fig. 8. Charging current as a function of working time by impinging electrification using the thinner.

3.3. 도체와 부도체의 대전 특성분석

유동대전에 의한 정전기 대전으로 축적된 전하의 방전, 완화 특성을 재질에 따라 분석하기 위해 도체와 부도체를 사용하여 정전기 대전 및 완화 실험을 수행하였다.

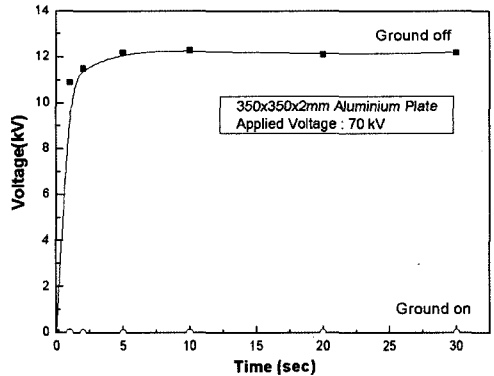


Fig. 9. Surface voltage as a function of working time at the conductor.

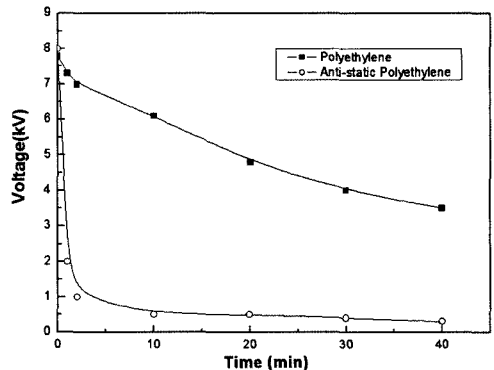


Fig. 10. Natural decay of surface voltage at non-conductor (polystyrene) and anti-static polyethylene.

Fig. 9는 도체에 대전을 시켰을 때 표면전위의 변화를 나타낸 그래프이다. 고전압 건에 70kV의 고전압을 인가하여 이온을 방출시켜 알루미늄 판의 표면을 대전시키면 수초 후 12kV 정도로 포화되는 것을 관찰 할 수 있지만 접지를 시켰을 경우는 표면전위가 증가하지 않음을 알 수 있다.

Fig. 10은 부도체인 폴리에틸렌에 대전을 시키고 자연감쇄를 측정 한 결과이다. 본 연구에서 사용된 폴리에틸렌은 밀도 0.9g/cm³, 비유전율 2.2~2.4 (8.854 × 10⁻¹²F/m), 체적 저항률 10¹²~10¹³(Ω·m)인 부도체의 값을 가진다. 그래프를 살펴보면 부도체의 경우 40분이 경과하여도 4kV정도의 비교적 높은 표면 전위를 나타내었다. 부도체의 경우는 접지를 통해서 대전 전위를 감소시킬 수 없기 때문에 도전성 물질을 사용하여 대전 전위를 낮출 수 있다. PE와 같은 부도체의 경우 완화시간이 길고 저항이 크기 때문에 접지를 통하여 정전기 완하시키기가 불가능하다. 도전성을 부가한 conductive polymer를 사용하거나 conductive material을 grid 형식으로 프린트한 anti-static polymer를 사용함으로써 표면 전위를 낮출 수 있다. 일반적인 폴리프로필렌과 마찬가지로 자연감쇄 실험의 결과를 Fig. 10에 함께 나타내었다. 실험 결과 도전성 물질을 포함한 재료와 도전성 물질을 코팅한 재료는 1~2분이 지난 이후 거의 0에 가까운 표면 전위를 가지는 것을 알 수 있다. 이것은 일반적인 polyethylene의 저항 값에 비해 conductive와 antistatic polyethylene은 도전성 카본을 함유하여 저항이 10⁴~10⁶(Ω·m)로 크게 낮아져 정전기적인 도체로 작용하기 때문이다. 대전을 시키고 접지를 했을 경우도 정전기상의 도체와 마찬가지로 대전 전위가 순간적으로 낮아짐을 알 수 있다.

4. 결론

유동에 의해 발생하는 정전기 특성을 분석하기 위해 석유류의 유체인 신너(tetrachloroethylene)를 사용하여 페루프시스템을 제작하여 유동에 의한 정전기 발생을 측정/분석하였다. 이상의 실험 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 유속 25~50cm/s에서 2~8nA의 유동대전 전류가 발생한다.
- 2) 유속 40cm/s의 유기용제가 흐를 때 1분 동안 누적에 의해 0.27μC 정도의 전하가 축적이 가능하

며, 이것이 쇠극자 크기의 도체에 축적될 경우 0.1mJ 정도의 방전에너지를 가지게 되어 일반적인 인화성 유기용제의 발화에 충분한 크기의 방전에너지를 가지게 된다.

3) Steel coil type의 electrostatic shield를 사용함으로써 파이프에 누적되는 유동대전을 완화시킬 수 있다.

4) 표면저항이 큰 부도체의 경우 완화시간이 길어 대전전위가 오랫동안 잔류하며, anti-static material을 사용하여 대전전위를 급격하게 감소시켜야 정전기 사고를 예방할 수 있다.

감사의 글 : 본 연구는 한국전기안전공사로부터 전력산업연구개발사업의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Watanabe, S., et al, "Effect of the Liquid Property on the Streaming Electrification n-Alcohol", IEEE transactions, Vol. 103-A, No. 6, pp. 315μ322, 1983.
- 2) Huh, C. S., Jeong, J. I., "Streaming Current of Thin Insulating Pipe under Electric Field", IEEE transactions on dielectric and electrical insulation, Vol. 5, No. 2, pp. 199μ203, 1998.
- 3) Kwak, H.R., Kweon, D.J., Son, C.K., "A Study on the Static Electrification for E.H.V. Power Transformers Using a Spinning Cylinder", J. of the Industrial Technology Research Institute Soong-Sil University, Vol. 23, pp. 41μ49, 1993.
- 4) Kim, D.S., Kweon, D.J., Kang, C.G., "Electrification Tendency of Oil Addong Moisture and Dust", J. of the KIIEE, Vol. 6, No. 5, pp. 50μ56, 1992.
- 5) <http://www.ece.rochester.edu/~jones/demos/nomogram.html>.
- 6) NFPA, "NFPA 33 Standard for Spray Application Using Flammable or Combustible Materials 2000 Edition", Nation Fire Protection Association, 2002.
- 7) W, M. Bustin, W.G. Dukek, "Electrostatic Hazards in the Petroleum Industry", Research Studies Press LTD, 1993.
- 8) McAteer, O.J., 1990, "Electrostatic Discharge Control", McGraw-Hill Publishing Company.
- 9) Chang, J. S., and Kelly, A. J., "Hand- book of Electrostatic Processes", Mareel Dekker, Inc., 1995.