



산업재해에 미치는 대전현상에 관한 연구

A Study on the Electrification Phenomena Affecting Industrial Disaster

육재호* · 안병준**
Jae-Ho Yuk · Byeong-Jun Ahn

ABSTRACT

The streaming current of insulating oil increases with increasing oil velocity and oil amount, A contact potential difference as an energetic state exists in the polymer thin film, both sides of which are contacted by two different metals having different work functions. Accordingly, the potential difference may be a cause for the short circuited transient current flowing through the external circuit. The polymers are electrificated as the electric field is supplied, and the currents flow with increasing temperature.

1. 서론

일상생활은 물론 모든 산업현장에서 여러 원인에 의해 정전기가 발생하며 정전기 대전에 의해 예기치 않은 여러가지의 장, 재해가 발생되고 있다. 이 정전기는 방전시 정전 에너지에 의해 주변의 가연성 가스, 증기 및 분진을 착화시켜 고분자 산업, 화학공업, 정유화학 산업계에서 화재 및 폭발등의 재해를 발생시키고, 반도체 소자의 제조, 조립과정에서 p-n 접합층이나 SiO₂층 혹은 Metal층을 파괴시키거나 성능저하를 초래하여 수율 및 품질저하를

가져온다.

그리고 IC가 포함된 자동화 설비 즉, 로봇트, 전자교환대, 컴퓨터 제어시스템 등에 오동작을 유발하여 사고 및 생산장해를 일으키며, 또한 섬유산업에서 생산성에 악영향을 미치고 있다.

정전기 대전현상에는 마찰, 박리에 의한 것, 충돌 및 파괴에 의한 것, 분체, 액체, 기체의 분출에 의한 것, 유체 등의 유동에 의한 것 등이 있다^{1,2)}. 이중 유동대전이라는 것은 절연성의 액체류가 파이프 등의 고체와의 접촉에 의해 액체와 고체와의 경계면에 전기이중층이 형성되어 이때 발생된 전하의 일부가 액체류와 함께 유동하기 때문에 정전기가

* 유한전문대학 전기과

** 동국대학교 산업안전공학과

발생하는 현상으로, 석유계 산업과 변압기등의 전력계통 산업에서 유동대전에 의한 재해가 자주 발생하고 있다.

또한, 고분자 산업에서는 필름등의 대전에 의해 생산장해를 일으키고 작업자들에게 전격을 일으키는 등 여러가지 장애가 발생한다. 이러한 여러가지 장애를 극복하기 위해서는 대전현상에 대해 충분히 연구하는 것이 매우 중요한 일이라 할 수 있겠다.

따라서 본 연구에서는 절연유와 고분자 재료의 대전현상을 규명하기 위하여, 절연유가 세관의 파이프를 통과할때와 금속면을 흐를때의 대전현상을 연구하였으며, 또한 이중금속으로 샌드위치된 고분자와 전압인가된 고분자의 대전현상을 검토하였다.

2. 이 론

2.1 계면전기

서로 두개의 상이 접촉하고 있으면 대부분의 경우 그 계면을 사이로 정, 부의 전기가 발생하고 두개의 상 사이에 전위차가 발생한다³⁾. 이 전위차를 접촉전위차라고 한다. 상의 한쪽이 액체, 기체 혹은 진공이어서 사실상 무한히 넓은 경우에는 계면으로부터 무한원의 장소의 전위를 영으로 하고 계면의 전위를 생각하며, 그것을 계면전위라고 말하고 있다. 예를 들면 $AgNO_3$ 용액과 동량의 KI 용액을 혼합하면 AgI의 미립자의 혼탁액이 얻어진다. 액중에는 복분해(復分解)에 의해서 K^+ 와 NO_3^- 및 미량의 Ag^+ 와 I^- 가 존재한다.

이중 I^- 쪽이 Ag^+ 보다 AgI 결정면에 대한 친화성이 강하기 때문에 보다 많이 흡착되어서 AgI 표면에 부의 전하를 준다. 이 입자면의 부의 전하는 액중의 정이온을 끌어 당겨서 Fig. 2의 (a)와 같이 입자 주위에 정전하의 운을 만들고 입자를 포함한

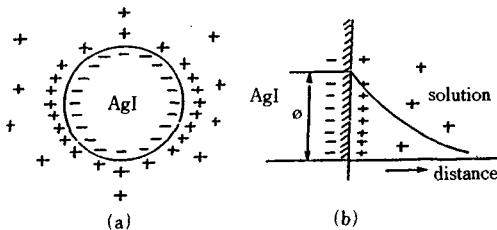


Fig. 1 Double layer structure and electric potential distribution of AgI in an aqueous solution

전체로서는 중성이 된다. 이와같은 정, 부의 정전기가 상대로 해서 존재하는 계를 전기이중층이라고 하고 전위분포는 Fig. 1의 (b)와 같다.

2.2 전기이중층의 전하 및 전위분포⁴⁾

전기이중층의 확산층의 이온분포가 Boltzman 분포를 따르고 전위가 Φ 인 장소의 정 및 부이온의 밀도를 N_+ , N_- , 전하밀도를 ρ 라 하면

$$N_{\pm} = N_0 \exp(\pm e\Phi/KT) \text{ [m}^{-3}\text{]} \quad (1)$$

$$\rho = eN_+ - eN_- \text{ [C/m}^3\text{]} \quad (2)$$

단, N_0 는 $\Phi = 0$ 인 곳의 정, 부 이온밀도이고 이온은 모두 1가로 한다. Φ 와 ρ 를 다음의 Poisson의 식으로 정리하면

$$d^2 \Phi / dx^2 = -\rho / \epsilon \quad (3)$$

$e\Phi \ll KT$ 인 경우 이상의 세 식으로 부터 다음 식을 얻는다.

$$\frac{d^2 \Phi}{dx^2} = 2e^2 \frac{N_0}{\epsilon KT} \Phi \quad (4)$$

$X = 0$ 에서 $\Phi = \Phi_0$ 로 되는 경계조건에서 풀면

$$\Phi = \Phi_0 \exp(-x/\delta) \quad (5)$$

단, 여기서 $\delta = \sqrt{(\epsilon KT/2e^2 N_0)}$ 이고 이중층의 평균적 두께를 나타내며 Debye길이라 한다. 그리고 Φ_0 를 ζ 전위라고 부른다.

(5)식을 (3)식에 대입해서 ρ 를 구하면

$$\rho = -\epsilon \frac{d^2 \Phi}{dx^2} = \frac{\epsilon \Phi_0}{\delta^2} \exp(-x/\delta) \quad (6)$$

여기서, 이중층은 간격이 δ 인 평균 콘덴서로 간주해서 그 면저하 밀도를 σ_0 라 하면 $\sigma_0 = \epsilon \Phi_0 / \delta$ [C/m^2]으로 표시되기 때문에 (6)식은

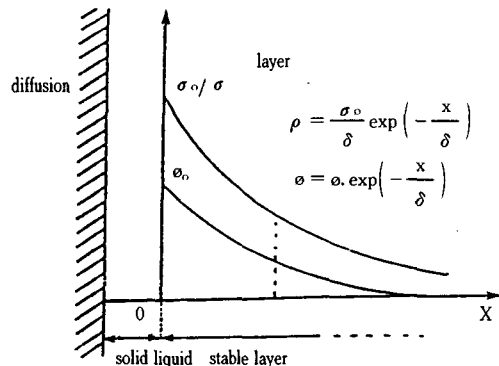


Fig. 2 Distribution of charge and electrical potential in double layer

$$\rho = (\sigma_0/\delta)\exp(-x/\delta) [C/m^2] \quad (7)$$

으로 된다. 단 ϵ 는 이중층의 유전율이다. 따라서 이중층 전하밀도 ρ 와 전위분포 Φ 를 Fig. 2와 같이 근사적으로 나타낼 수 있다.

3. 실험

세관을 통과하는 오일의 대전현상을 살펴보기 위하여 아르곤 가스에 의한 압송식으로 변압기유 (ASTM D-3487 규격의 TYPE II)가 통과하도록 장치를 제작하였으며, 그 구성은 직경이 3[cm], 길이 30[cm]의 동파이프로 된 변압기유 탱크와 상부는 실리콘 호스로 고압 아르곤 가스 분배에 접속되어 있으며 탱크 하부는 파이프 입구부분에서 액체의 흐름이 원활하게 되도록 하기 위해서 확산각 120°로 가공하였다. 파이프는 스텐레스 주사침으로 내경 0.2[mm]이며 유동전류를 측정하기 위해서 미소전류계(TAKEDA 8401)를 파이프에 접속시켰다.

변압기내에서 순환되는 변압기유의 대전현상을 보기 위하여 22.9/3.3[KV] 3Ø 100[KVA]인 변압기를 초고압 대용량 모델 변압기로 개조하여 사용하였다. 유량을 조절하기 위하여 DC모타의 전압을 조절하여 펌프의 회전수를 조절하였으며 유량을 측정하기 위해서 적산형 유량계를 부착하였으며 라디에이터, 펌프 및 유량계를 직렬로 접속하여 변압기 본체에 연결시켰다. 그리고 절연유의 온도변화를 위해 용량이 2[KW]인 히터 4개를 변압기 본체에 부착시켰다. 코일 및 절연지로부터 발생하는 유동 대전 전하에 의한 전류를 측정하기 위하여 고압측 Y형 결선 코일의 중성점으로부터 단자를 도출시켜 미소전류계를 연결시켰다.

이중금속으로 샌드위치된 고분자의 대전현상을 보기 위하여, 고분자는 필름상의 폴리에틸렌 테레프타레이트(polyethylene terephthalate, PET) (三菱油化製)를 이용하였으며 금속은 순도 99.999 [%] (三律和社製)인 Cu, Au를 사용하여 5×10^{-5} Torr 정도의 진공에서 고분자의 양면에 금속을 증착하여, M₁-P-M₂ 구조인 샌드위치상 시료를 만들었다. 시료는 항온조에 넣어 65°C까지 전류연속 제어장치로서 균일한 승온속도 $\beta = 0.4^\circ\text{C}/\text{min}$ 로서 승온시켰다. 65°C에서부터 40°C까지 강온시킬때는 자연냉각법을 이용하였다. 단락전류는 정밀진동용

량형전위계(VRE)이며, 가드전극이 있는 주전극에 VRE전류계를 직결하여 측정하였고, 전류의 방향은 VRE전류계의 방향이 정일때를 정(즉 M₁으로부터 M₂를 향하여 전류가 흐를때)으로 하고, 그의 반대를 부방향으로 정하였다.

전압인가된 고분자의 대전현상을 보기 위하여 시료는 두께 20[μm]인 필름상 고밀도 폴리에틸렌 (日本 三菱油化製 Yukalon PX)을 사용하였으며 열자극전류(TSC) 측정은 O₂ 20%와 N₂ 80%의 건조한 혼합가스중 실온에서 시료에 고전계 1MV/cm를 1시간 인가한 다음 제거하고 일정한 경과한 후, 외부 바이어스전압(V_b)을 인가하고 나서 일정한 승온속도(β)로써 온도를 상승시키면서 TSC를 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 세관을 흐르는 오일의 대전현상

절연성 액체가 세관을 통과하면 대전하게 되며 이러한 현상을 정량적으로 관측하기 위해 세관을 통과하는 액체의 유동속도를 변화시켜 가면서 측정 한 대전전류를 Fig. 3에 도시하였다. 유속이 증가함에 따라 유동전류는 직선적으로 증가하는 경향이 다. 계면부근에서 액체측으로부터 고체로의 전하

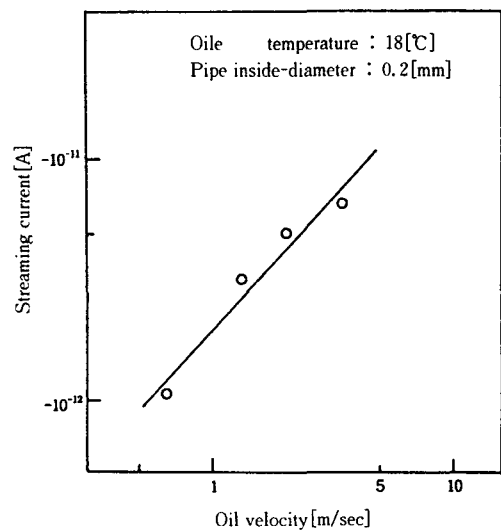


Fig. 3 Streaming current vs. oil velocity characteristics

완화시간을 τ , 유속을 v 라 할때 계면에서 분리되는 전하량은 $\tau \cdot v$ 에 비례하므로 유속의 증가와 함께 분리되는 전하량이 증가한다는 결과를 인용하면 유동전류의 증가 경향을 이해할 수 있다.

관측되는 전류방향이 부(-)방향으로 흐르고 있으며 이는 절연유와 파이프의 계면에서 화학적 포텐셜에 의해 절연유내에 있는 부이온을 파이프 표면에 흡착시켜 고착층을 형성하고 쿨롱(coulomb) 인력에 의해 정(+)이온을 잡아당겨 고착층 외부에 확산층을 형성한다⁵⁾

이러한 2개의 층을 전기이중층 이라 하며 액체의 유동과 함께 확산층에 있는 정이온이 액체의 유동과 함께 이동하여 전하분리가 일어나서 파이프 표면에 흡착된 고착층 부이온내의 전자가 파이프로 완화되어 부방향의 유동전류가 형성되는 것이다.

4.2 금속면을 흐르는 오일의 대전현상

절연유의 유온을 상온 20, 40, 60[°C]로 일정하게 유지시키고 유량을 270~900[L/h]로 변화시킬때 변압기 내부 금속면을 유동하는 액체가 대전됨에 따라 접지단자로 흐르는 전류를 Fig 4.에 도시한다. 보편적으로 유량증가에 따라 비례하여 대전전류가 증가하는 경향이며 유온이 증가함에 따라 대전전류는 감소하는 특성을 나타내고 있다. 일반적으로 접지단자로 흐르는 전류(I_n)는 절연유가 강제순환될 때 코일 및 절연지에 부전하가 발생하므로써 흐르는 부의 유동전류(I_c)와 라디에이터, 외함 기타 순환계통에서 고체와의 접촉유동으로 절연유내에 발생된 정전하가 중성점 단자로의 완화로 인하여 흐르는 완화전류(I_r)와의 산술적 합으로 된다. 유온이 상승함에 따라 절연유의 전도도가 증가함으로서 라디에이터, 외함, 기타 순환계통에서 유동대전으로 발생된 절연유내 정전하가 중성점 단자로 완화되기 전에 라디에이터, 외함, 기타 순환계통의 파이프로 빨리 완화되어 중성점 단자로서의 완화전류 성분인 I_r 이 감소되어 상대적으로 I_c 가 증가하여 온도에 따라 I_n 는 감소하게 된다. 이와같은 현상이 현저하게 일어날 경우 정(+)전류에서 부(-)전류로 극성반전이 일어나는 것으로 생각할 수 있다⁶⁾. 그러므로 본 실험결과로써 라디에이터, 외함 기타 순환계통에서 발생된 정전하가 대전전류에 큰 영향을 미친다는 사실을 추정할 수 있다.

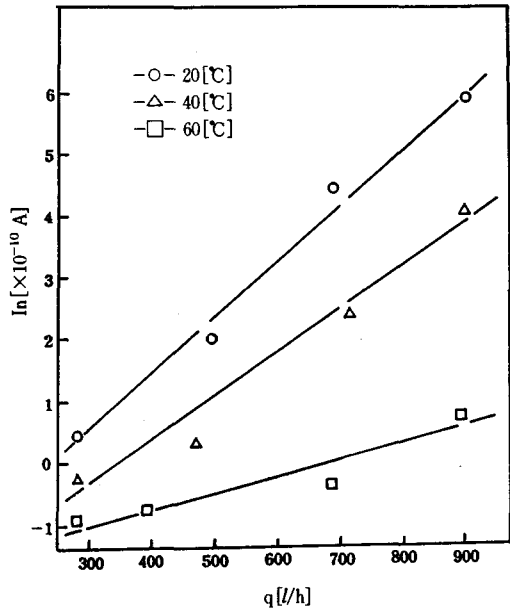


Fig. 4 Dependence of neutral terminal current on oil flow rate

4.3 이중금속으로 샌드위치된 고분자의 대전현상

고분자 물질인 폴리에틸렌 테레프타레이트(PET)의 한쪽면에는 금(Au)으로 증착하고 다른쪽면에 동(Cu)으로 증착한 시료를 항온조에 넣고 온도를 승온한 후 실온으로 내렸을 때 시료를 통하여 흐르는 전류를 Fig. 5에 도시하였다. 일반적으로 물질에 전압을 인가하지 않으면 전류는 흐르지 않는다. 그런데, 본 실험에서는 PET의 양면에 다른 금속으로 접촉시키고 온도를 변화시키면 전압을 인가하지 않고도 단락전류가 흐르는 현상을 관측하였다.

이는 이중금속간에 놓인 고분자 물질내에 접촉전위차가 나타나고 있음을 알 수 있으며 이는 이중금속의 일함수의 차에 해당하는 접촉전위차 고분자의 벌크내 energetic state로 존재하고 이 에너지 상태를 온도변화에 일정하나 시료의 유전율이나 전극간 정전용량이 온도에 따라 변화하므로 양극 표면에 전하의 차가 생겨서 열평형상태로 천이하는 과정에서 단락전류가 흐르는 것으로 추정된다.

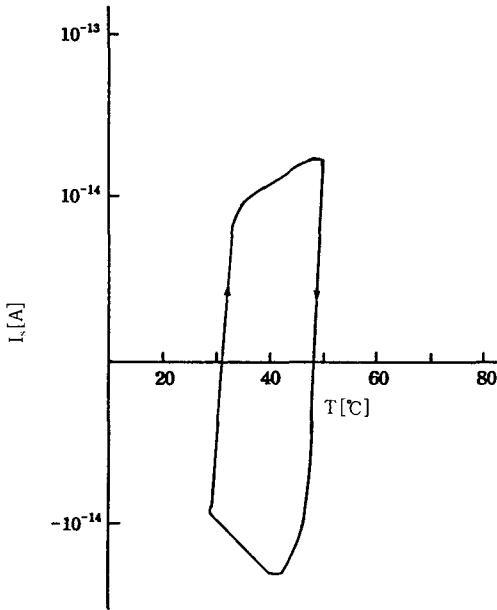


Fig. 5 Short-circuit current for Au-PET-Cu system as a function of temperature

4.4 전압이 인가된 고분자의 대전현상

고분자 물질인 폴리에틸렌(PE)필름에 고전계 $Fe = 1 [MV/cm]$ 를 실온에서 한시간 인가시킨 후 전압을 제거하고 항온조에 넣은 후 전압을 인가하

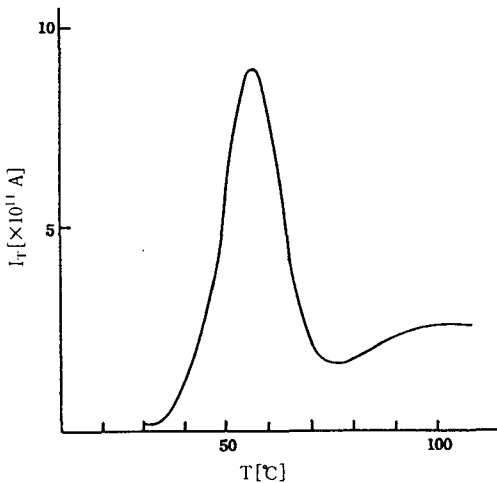


Fig. 6 TSC characteristics

지 않고 온도를 변화시키면서 측정하는 전류를 Fig. 6에 도시한다. 이때 승온속도는 $1 [^{\circ}C/min]$ 로 하였다.

고전계로 처리된 물질은 대전되어짐을 알 수 있으며 이러한 현상은 고전계인 가시 쌍극자의 배향 및 전하의 트랩이 일어남을 알 수 있으며 단락시 온도변화에 따라 쌍극자의 재배향이나 트랩되었던 전하가 풀려나옴으로써 전류가 흐르는 것으로 추정할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 절연유와 고분자 재료의 대전현상을 연구하였으며 그의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 절연액체가 세관을 통과할 때 대전되며 액체의 유동속도가 증가할수록 대전량이 증가한다.
- 2) 절연성 액체가 금속면을 따라 유동하면 대전되며, 이의 대전량은 유량증가에 따라 선형적으로 증가하나 유온이 상승하면 급격히 감소하다가 극성반전되는 현상이 나타난다.
- 3) 고분자 필름양면에 이중금속으로 진공 증착시키면 이중금속의 일함수차에 해당하는 접촉전위가 발생하여 온도변화에 따라 단락전류가 흐른다.
- 4) 고분자 물질에 전압이 인가되면 고분자 물질은 대전되며 온도를 변화시키면 전류가 흐른다.

참 고 문 헌

- 1) 淺田敏勝, 靜電氣障害. 災害, 靜電氣學會誌, 12, 2 pp.136~140. 1988.
- 2) 檜垣勝, 宮尾博, 絶緣油の流動帶電特性に及ぼす交流, 直流電界 影響, 靜電氣學會誌, 8, 2, pp. 133~140. 1984.
- 3) 北原文雄, 界面電氣現象, 共立出版, pp.1~4. 1978.
- 4) 淺野俊和, 大橋朝夫, 靜電氣工學演習, 朝倉書店, pp.33~34, 1985.
- 5) 大橋朝夫, 下川博文, 靜電氣學會研究會資料, ED-83-67, pp.37, 1983.
- 6) M. Yasuda, et al. : Suppression of Static El-

육재호, 안병준

ectrification of Insulating Oil Large Power Tr-
ansformers, the IEEE PES Winter Meeting, N,

Y, Paper 82, WM(Jan/Feb. pp.1911~1912,
1982.
