

2000년도 대한전기학회 전문대학교육연구회 하계학술대회 논문집 2000. 7. 7-8

침 전극을 이용한 전하 주입과 유동대전 감소 특성

°김용운*, °이덕출**, °강창원**
세경대*, 인하대학교**, (주)PSD Tech.***

Charge Injection by Needle Electrode and Reduction Properties of Streaming Electrification

°Yong-Woon Kim*, Duck-Chool Lee**, Chang-Won Kang***
Saekyung College*, InHa Univ**, PSD Tech.***

Abstract - The electric charge generated by flowing insulation liquid can create hazardous spark in transfer line and receiving tank etc. These electrification has generally been measured by current measurement with a ammeter connected to the receiving tank. This paper reports on the experimental result obtained by this method. As a experimental results: The injected charge value for unit volume increased in the following condition : the edge of the needle electrode was sharp, the number of needle electrode was fewer, the edge of the needle electrode was located close to the inside wall. When the charge density in the charge reducer is constant, electrode current and electrode potential by the charge injection from outside increase with increasing of oil velocity and streaming current. The electrode potential in charge reducer is made maximum value at edge point of reducer inside and minimum value at center line of charge reducer.

1. 서 론

절연성이 양호한 액체가 도전성 고체와의 계면에서 유동할 시 액체 중에 포함된 전하들이 분리됨에 따라 국부적으로 전계가 형성된다[1,2]. 형성된 전계력이 커질 경우 유중코로나 방전 혹은 유면 연면 방전등이 발생되고, 이것이 전전되어 대용량 변압기의 폭발사고로까지 이어진다[3,4]. 선진국에서는 이러한 사고를 미연에 예측하고 방지하기 위한 연구가 활발히 수행되어 오고 있으며[5,6,7], 대책으로는 전하 발생의 최소화와 발생된 전하의 조속한 완화로 크게 분류될 수 있다. 전자의 경우로는 액체의 유동속도를 감소시키는 방법, 액체와의 접촉면을 가공하여 연면 방전을 최소화시키는 방법 등이 있고, 후자의 경우에는 액체 중에 계면활성제를 혼입하여 발생된 전하를 조속히 완화시키는 방법[8,9], 액체 중에 발생된 전하와 반대극성의 전

하를 주입하여 중화시키는 방법 등이 알려져 있다. 본 실험에서는 대전된 절연유가 흐르는 관로 도중에 제전기를 연결하여 이미 대전된 절연유내에 반대극성의 전하를 외부로부터 주입시킴으로서 제전 효과를 얻고자 하는 방식이다. 실험 결과에 따르면 외부로부터 주입되는 전하량은 절연유의 대전량에 비례하여 주입됨으로서 충분한 제전효과가 나타났으나, 절연유의 대전량이 어느 임계치 이상일 경우 주입되는 전하의 제어가 문제점으로 대두되었고, 사용된 침 전극의 형상 및 위치는 제전효과와 밀접한 관계가 있는 것으로 나타났다.

2. 실험장치 및 방법

절연유를 순화시키기 위한 펌프, 중화탱크, 정 전하 및 부 전하를 각각 발생시키는 병렬 라인의 대전기구, 제전기, 그리고 저장탱크로 크게 구성된다. 제전기내 삽입전극은 스테인레스 재질을 이용하여 길이 28[mm], 직경 0.8[mm]의 크기로, 전극의 끝은 중심 축을 기준으로 30°, 60°, 90°의 세가지 모형으로 제작하였다. 제전기는 테프론을 사용하여 내경400[mm], 외경500[mm], 길이3000[mm]의 원통형으로 설계 제작하였으며 인접파이프와의 전하 이동을 최소화하기 위해 관의 양끝은 테프론으로 격리하였다. 중화탱크는 한면이 가로 세로 각각 3000[mm], 5000[mm]의 사각형태로 유온 조절이 가능하도록 외부에 판 히터를 부착하였다.

대전장치로는 자동차 연료필터(액체를 정, 고체를 부로 대전시킴)와 동 파이프 내에 면 필터를 삽입한 기구(액체를 부, 고체를 정으로 대전시킴)를 병렬 연결함으로서 원하는 극성으로 절연유를 대전시킬 수 있다. 저장탱크는 스테인레스를 이용하여 직경 6000[mm], 높이 8000[mm]의 크기로 제작한 후 외부로부터의 정전용량 및 기타 노이즈의 영향을 최소화하기 위해 직경7000[mm], 높이 9000[mm]의 원통형 차폐통 내에 설치하였다.

측정기로는 미소 전류계(picoammeter) 3대를 이용하여 대전장치와 제전장치 및 저장탱크에 각각 별도로 연결하여 대전 양과 제전 양 그리고 저장탱크 내의 잔류 전하량의 크기를 관측할 수 있게 하였다. 그림1에 전체적인 실험장치를 나타내었고 그림2와 그림3에 각각 제전기의 구조도와 전극의 모형을 도시하였다.

3. 결과 및 고찰

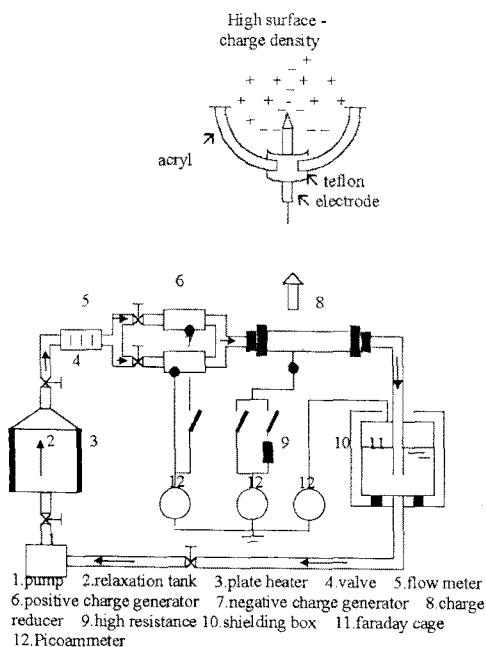


그림 1 전하 주입에 의한 제전장치

Fig. 1 Schematic diagram of charge reduce by charge injection

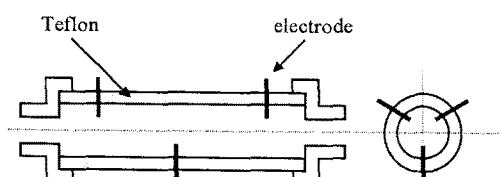


그림2 제전기의 구조도

Fig. 2 Structure diagram of charge reducer

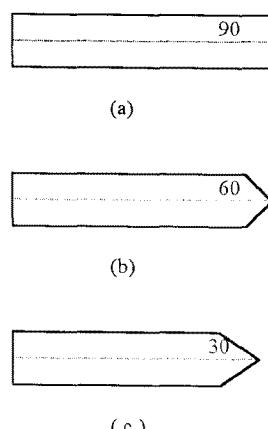


그림 3 전극의 모형
Fig. 3 Models of electrodes

3.1 유속과 유량의 관계

본 실험에서 펌프에 의해 송유된 절연유의 유출량, 즉 [$\ell/\text{min.}$]를 유속 [m/s]으로 환산하기 위해 먼저 절연유가 최종적으로 유출되는 파이프 끝에 대형 매스 실린더(Mass cylinder)를 놓고 일정량의 액체가 유출된 시간을 측정한다. 이 유출량과 시간으로부터 1초간 흐른 액체의 양을 구한다. 유출량과 유속간에는 일반적으로 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$v \times r^2 \times \pi = X \quad (1)$$

여기서 v : 유속 [cm/s]

r : 유출 구의 반경 [m]

X : 1초간의 유출된 양 [ml/s]

π : 원주율

본 실험에 사용된 제전관의 반경 $r : 0.02[\text{m}]$ 를 식 (1)에 대입한 후 [M.K.S]단위계로 하기 위해 우변을 1×10^6 으로 나누면

$$v = 25X / \pi \quad (2)$$

로 된다.

실측 결과 5 [$\ell/\text{min.}$]의 경우 1초당 X 의 값은 83.3[ml]가 되고 따라서 유속은 6.6[cm/s]가 된다.

그림4는 X 와 v 의 관계를 나타낸 것으로 상호 비례 관계에 있음을 이해 할 수 있다. 또한 그림5는 식 (2)에서 X 의 값을 증가시킬 때의 유동전류의 변화 특성을 나타낸다. X 의 값이 증가함에 따라 증가율은 감소되지만 유동전류는 꾸준히 증가함을 알 수 있다.

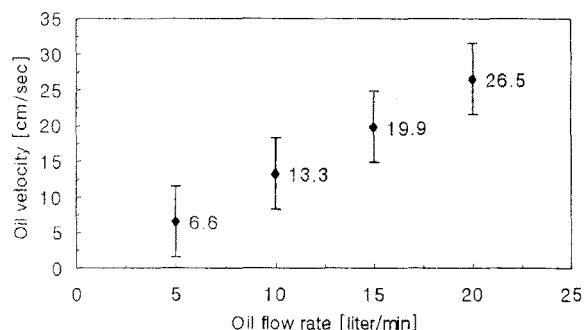


그림4 유출량과 유속의 관계

Fig.4 Relationship between oil flow rate and oil velocity

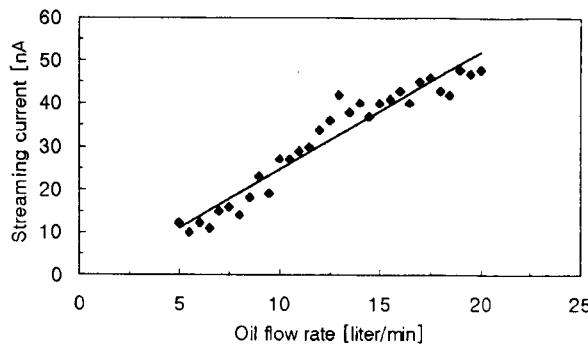


그림 5 유출량과 유동전류의 관계

Fig. 5 Relationship between oil flow rate and streaming current

3.2 제전 기구의 해석

완화탱크로부터 중성화된 절연유가 대전장치와 제전기를 통과한 후 최종적으로 저장탱크에 저장되는 과정을 그림6에 간략하게 도시하였다. 그림에서 완화탱크로부터 유입된 중성의 절연유가 대전장치에서 정 혹은 부로 대전됨으로서 흐르는 전류를 유동전류 I_s , 대전된 절연유가 제전기구에 이르렀을 때 대전된 유중 전계로 인해 침 전극을 통하여 반대극성의 전하가 외부로부터 주입됨으로서 흐르는 전류를 전극전류 I_e , 제전기구로부터 다시 중성화된 절연유가 저장탱크에 저장되고 이때 이상제전과 부족제전 혹은 이상제전과 과잉제전의 차로 인해 흐르는 전류를 I_f 라 한다.

이들 3종 전류 사이의 관계는 그림6을 예로 들 경우식 (3)으로 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 (+I_s) + (-I_e) &= +I_f : \text{부족제전} \\
 (+I_s) + (-I_e) &= -I_f : \text{과잉제전} \\
 (+I_s) + (-I_e) &= 0 : \text{이상제전}
 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 I_f 는 저장탱크의 잔류전하로 인해 흐르는 전류로 제전의 정도를 나타내는 중요한 수치이다.

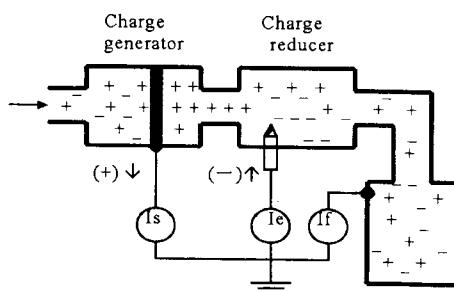
그림 6 I_s , I_e , I_f 간의 상관관계

Fig. 6 Relation among I_s , I_e and I_f

3.3 전극 모형과 제전율의 관계

그림7은 유온을 $20[^\circ\text{C}]$ 로 유지하고 전극 모형별 각각 3개씩을 파이프 내벽면으로부터 $10[\text{mm}]$ 의 위치에 설치하였

을 경우 유량과 제전율의 관계를 나타낸다.

그래프에서 전극각도 60° 의 경우 전 유량에 걸쳐 비교적 이상적인 제전경향을 나타내는 반면, 30° 전극의 경우는 부방향의 전류가, 90° 의 경우는 정 방향의 전류가 관측됨을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 30° 전극의 경우 침 대 절연유 사이에 강한 고 전계가 형성(전극의 끝이 뾰족할수록 전극 주변의 이온농도는 높아짐) 되고 이 전계력으로 인해 외부로부터 절연유 중의 전하와는 역극성의 부전하가 과잉으로 주입된 결과 절연유 중의 대전 전하들을 중화시키기도 남은 부전하들이 저장탱크 내에 잔류하여 초기 대전과는 반대로 대전되는 극성의 반전, 즉 역대전을 초래한 결과이다. 따라서 저장탱크로부터 부극성의 전류 $-I_f$ 가 흐른다. 90° 전극의 경우 침 대 절연유 사이에 약한 전계가 형성된 결과 외부로부터 역 극성의 부전하가 부족하게 주입된 결과 절연유 중의 대전 전하들을 완전하게 중성화시키지 못하고 이로 인해 남은 정전하에 의해 저장탱크로부터 정 방향의 전류가 흐르게 되어 부족제전이 일어남을 알 수 있다.

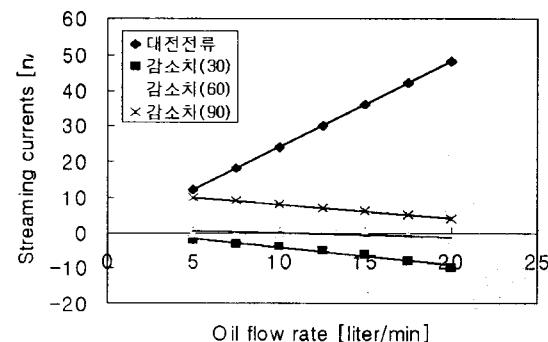


그림7 전극모형과 유동전류의 관계

Fig. 7 Relation between electrode shape and streaming current

3.4 전극 수와 제전율의 관계

그림8은 일정한 실험 조건하에서 이상적인 제전율을 나타낸 각도 60° 의 전극을 파이프 내벽으로부터 $10[\text{mm}]$ 의 위치에 1개부터 4개까지 순차적으로 설치하여 이때의 유량 변화와 제전율의 관계를 나타낸다. 그래프에서 4개의 전극을 설치하였을 경우에 비해 설치되는 전극의 수가 적어 질수록 이상 제전값(zero line)을 지나 부로 역 대전됨을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 파이프 내의 절연유 중에 형성된 전계력은 일정한 값을 가지는 상태에서 설치되는 전극의 수만큼 전계 분배가 일어난다. 전계가 분산 된 만큼 전극 1개당 형성되는 전계력은 약화되며 때문이다. 역으로 여러 개의 전극을 설치하였을 경우 보다 강한 고 전계가 형성되고, 이와 같은 고 전계에 의해 외부로부터 역 극성의 전하가 과잉으로 주입됨으로서 극성의 반전을 일으킨 후 역 대전되는 것으로 사료된다.

한편 동일 유속에 있어서 전극 수가 1개일 때의 저장탱크(Faraday cage)의 전류 $-I_t$ 가 유동전류 I_s 에 비해 그 값이 다소 적음($+I_s + (-I_t) \neq 0$)을 알 수 있는데 이는 전극이 제전기 내에 실제로 설치된 10[mm] 지점이 내벽에 보다 가까운 5[mm]지점 보다 전계가 약한 만큼 그 차이에 기인하는 것으로 사료된다.

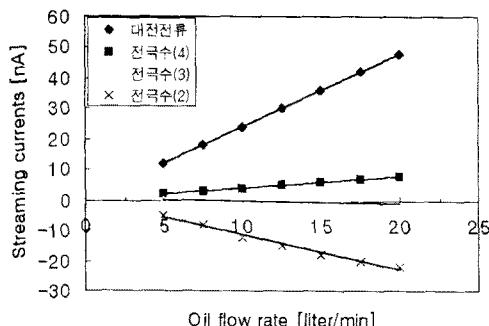


그림 8 전극수량과 유동전류의 관계

Fig. 8 Relation between electrode numbers and streaming current

3.5 대전전위와 전극전위의 관계

그림9는 대전 장치로부터 흐르는 유동전류에 의해 형성된 대전전위와 제전기의 침 전극을 통하여 외부로부터 주입된 반대 극성의 전하에 의해 완화 된 후의 잔류전하에 의해 측정 가능한 전극전위의 관계를 유량 변화에 따라 나타내었다. 이때 유온은 20[°C], 전극 수는 모형별 3개씩을 120°각도로 하여 파이프 내벽으로부터 10[mm]지점에 위치하였다. 유량의 증가와 함께 유동전류 I_s 가 증가함에 따라 90°전극의 경우 정의 전위가 형성된 반면에 30°전극의 경우 부의 전위가 형성됨을 알 수 있는데, 전극전류 I_e 가 유동전류 I_s 보다 클 경우는 부의 값(부 전하의 과잉주입)으로 되는 반면에 I_e 가 I_s 보다 작을 경우에는 정의 값(부 전하의 부족주입)이 되기 때문이다.

또한 I_s 에 비례하여 3종 전극의 전극전위는 다소 부로 증가하는데 이는 대전된 절연유가 흐르는 파이프의 단면적을 S , 액체의 평균 유속을 v , 액체의 평균 체적 전하밀도를 ρ 라 할 때 유동전류

$$I_s = S v \rho \quad (4)$$

로 나타내어지고 S 및 ρ 가 일정할 경우 I_s 는 v 에 비례 한다. 한편 전극전류 I_e 는 전극에 직렬로 연결된 $1 \times 10^{10} [\Omega]$ 의 저항을 통하여 흐르는 전류이고, 따라서 전극전위 V_e 는 이미 알고 있는 고 저항의 값 R_o 에 I_e 를 곱하여

$$V_e = I_e R_o \quad (5)$$

로 된다.

결국 저항 R_o 는 상수이므로 전극전위 V_e 는 전극전류 I_e 에 비례하고 I_e 는 다시 I_s 에 지배받는다.

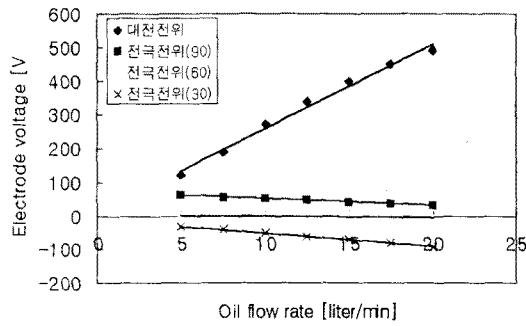


그림 9 대전전위와 전극전위의 관계

Fig. 9 Relation between oil flow rate and oil velocity

3.6 전극 위치와 전극 전위의 관계

그림11은 유온 및 유량을 각각 20[°C], 20[l/min.]로 일정하게 유지한 상태에서 제전 파이프 내에 설치된 전극의 위치와 제전율의 관계를 나타내었다. 제전기 내부로 삽입한 침 전극을 절연유의 흐름과 직각 방향으로, 즉 원통형 제전기의 0° 위치에서 180° 위치를 향해 일정한 간격으로 움직일 때 전극의 위치에 따른 제전율을 전위차원에서 나타내었다. 그래프의 X축은 절연유가 흐르는 원통형 제전기 단면의 중심에 전극을 설치하였을 경우를 0, 전극을 중심선으로부터 상부에 설치하였을 경우를 정, 하부에 설치하였을 경우를 부로 표시한다. 그래프에서 알 수 있듯이 제전기의 중심부인 0에서 최소치의 전극전위를 보인 반면 정 및 부 방향을 향하여 중심부로부터 멀어질수록 전위는 비슷한 비율로 증가함을 알 수 있다. 본 실험에 사용된 제전기와 같이 단면적이 원통일 경우 단면적상 유중 전하분포를 정전기학 원리에 의해 그림10에 나타내었다[10]. 그림에서 제전기의 중심부위 보다는 내벽면 측의 전하밀도가 높고, 상호 대칭적으로 분포한 이들 전하에 의해 외측을 향하여 작용하는 전계를 발생하는 능력은 있지만 (E_2), 내측으로는 상호간 상쇄되어 전계를 발생하는 능력이 없다 (E_1). 따라서 내벽면 측에 형성된 고 전계에 의해 유중 전하를 형성하는 자기전계작용이 반복되고, 최종적으로는 벽면에서 절연파괴를 일으키는 원인이 된다. 고전계가 형성되어 있는 내벽 면 근처에 끝이 뾰족한 침 전극이 존재할 경우 침 끝에 형성된 고전계에 의해 외부로부터 역극성의 전하가 다양 주입되는 것으로 판단된다.

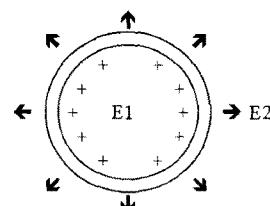


그림10 대칭분포 전하에 의한 무 전계 공간

Fig.10 Zero electric field space by symmetry charge distribution

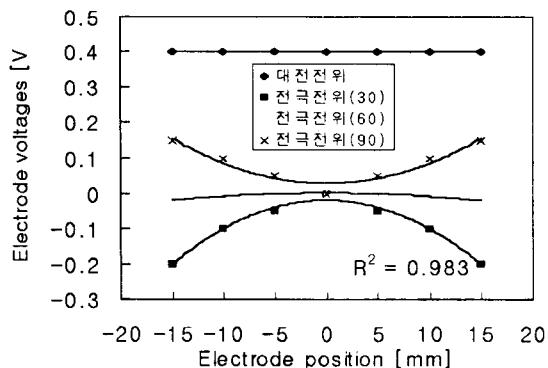


그림 11 전극위치와 전극전위의 관계

Fig. 11 Relation between electrode position and electrode potential

4. 결 론

절연유가 흐르는 관로 도중에 원통형 제전기를 설치하고 절연유내의 대전된 전하와 반대극성의 전하를 외부로부터 주입하는 제전효과에 대한 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 일정온도에서 절연유내의 대전전하로 인해 흐르는 유동 전류는 5~20[l/min] 범위내에서는 유속에 비례하여 증가하였다.
- (2) 절연유내 대전전하와 역극성의 전하를 주입하기 위해 사용된 전극의 경우, 모형 60°, 수량 3개의 경우에서 이상에 가까운 제전효과를 나타내었다.
- (3) 침전극을 통하여 주입되는 전하에 의한 전극전류(I_e)는 전극전위(V_e)와 유동전류(I_s)에 지배받는 것으로 나타났다.
- (4) 원통형 제전기의 단면적상의 전극위치에 따라 제전효과를 조사한 결과 전극 끝단의 위치가 가장자리에 가까울수록 높은 전계가 형성되고, 이 전계에 비례하여 전하가 주입되는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- [1] H. D. Goodfellow, W. F. Graydon, Can.J.Chem. Eng., p. 46, 243, 1968.
- [2] M. Fujii, A. Ohashi 외, "New method of decreasing the oil surface potential in a tank with an electrostatics screener", IEEE, Trans. on electr. Insulation, Vol. EI-20, No. 2, Apr., 1985.
- [3] M. Higaki 외, "A calculation of potential distribution caused by static electrification owing to oil flow in a oil and paper insulation system and It's application to partial discharge phenomena in oil", IEEE, Vol., PAS-98, No.,4, 1979.
- [4] R. Tamura and T. Watanabe, "Static electrification by forced oil flow in large power shell form transformer", Japan electrostatics society., 3, 5, pp. 266~273, 1979.

[5] David L. Chapman, "A Contribution to the theory of electro capillarity", Phil. Mag. S. 6. vol. 25, No. 148, April, 1913.

[6] Von P. Debye und E. Huckel, "Bemerkungen zu einem Satze Über die Kataphoretische Wanderungsgeschwindigkeit suspendierter Teilchen", Physikalische zeitschrift vereinigt mit dem Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik Jakrgang Bd. 25, Nr. 3, 1, S. 49~56, Februar, 1924.

[7] G. Schon, Chem. Ing. Techn., p. 34, 432, 1962.

[8][7]의 pp. 150~168

[9] J. A. Carruthers, K. J. Marsh, J. Inst. Petr., p. 48, 462, 169, 1962.

[10] I. Ginsburgh, "The static charge reducer", Journal of colloid and interface science, Vol. 32, No. 3, March, 1970